

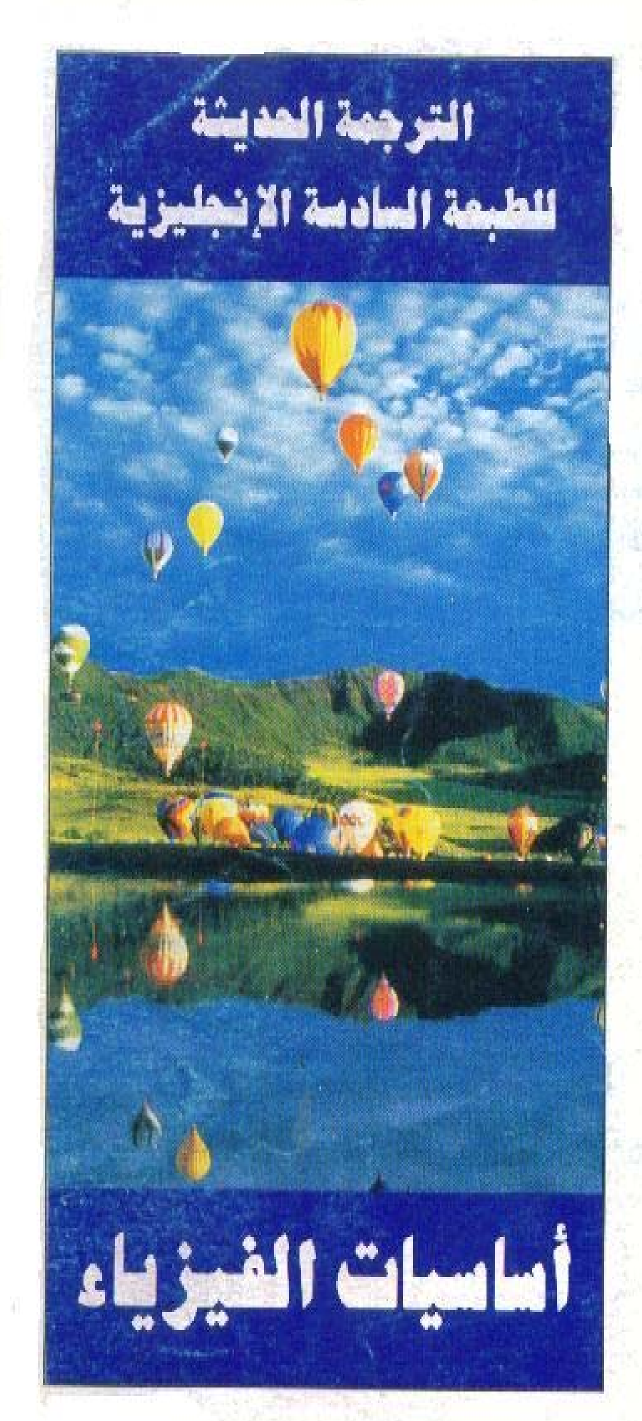
أساسيات الفيزياء



...ش
جيرد

الدار الدولية للإستثمارات الثقافية ش.م.م.
مصر

Ben Rabah



الطبعة العربية الأولى

الدار الدولية للاستثمارات الثقافية

فريدريك . ج . بوش

بجامعة دايتون سابقاً

دافيد . أ . جيرد

جامعة سانت كلاود الحكومة

ترجمة

الدكتور سعيد الجزيرى

أستاذ الفيزياء - كلية العلوم

جامعة القاهرة

الدكتور محمد أمين سليمان

أستاذ الفيزياء - كلية العلوم

جامعة القاهرة

مراجعة

الدكتور أحمد فؤاد باشا

أستاذ الفيزياء وعميد كلية العلوم

جامعة القاهرة



فريدريك . ج . بوش :

أستاذ متميز بجامعة دايتون ـ متفرغ . حصل على البكالوريوس من جامعة ميتشجان وعلى دكتوراة الفلسفة في الفيزياء من جامعة كورنيل . وبعد أن عمل بعد الدكتوراة في مجال الفيزياء الكيميائية ، شغل منصب الأستاذية في جامعات وايومنج ، آكرون ودايتون . وقد أسفرت أبحاثه في مجال فيزياء البوليمرات والبلاستيك عن نشر نحو مائة بحث وكتاب ذى مستوى متقدم للدراسات العليا في نفس المجال . واعترافًا بمكانته العلمية تم انتخابه كزميل بالجمعية الفيزيائية الأمريكية .

ولما كان « بوش » معلمًا بالدرجة الأولى فقد قام بتدريس الفيزياء على جميع المستويات خلال مراحل عمله ، بما في ذلك قضاء عامين مع فيلق السلام في تركيا . وقد ألف عددًا من كتب الفيزياء الأولية التي يستخدمها كثير من الطلاب في العالم بأسره .

دافيد ، أ . جيرد :

هو أستاذ ورئيس قسم الفيزياء والفلك والعلوم الهندسية في جامعة سانت كلاود (مينيسوتا) الحكومية . وقد حصل على درجة الماجستير في الفيزياء من جامعة مينيسوتا ، ودرجة دكتوراة الفلسفة من جامعة واشنطون . وفي الفترة من 1957 حتى 1969 عمل كفيزيائي باحث في شركة بوينج في سياتل وانخرط في بحوث أساسية في مجال فيزياء البلازما والبحوث التطبيقية حول الاستشعار بالأشعة تحت الحمراء وتكنولوجيا الليزر .

وانضم البروفيسور جيرد عام 1969 لهيئة تدريس جامعة سانت كلاود الحكومية حيث قام بتدريس الفيزياء على مدى الخمس وعشرين سنة الماضية واشترك في البحوث المنشورة في فيزياء البلازما وألف طبعتين من الدليل الدراسي المصاحب لكتاب الفيزياء الأساسية للكليات الذى وضعه ج . موليجان .

الفلسفة الأساسية للكتاب :

بداية فإن هذا الكتاب لم يراد له أن يكون موسوعيًا ، ولا أن يحتوى على اشتقاقات رياضية مطولة أو سير تاريخية . ويتم تناول كل مبدأ أساسي لتوضيح معناه ، ثم كتابته على صورة رياضية ، ثم الانتقال مباشرة إلى تطبيقه فى أمثلة محلولة وتوضيحية ويتم تقريب المبادئ إلى الأذهان وتنميتها بواسطة أمثلة مستقاة ـ كلما كان ذلك ممكنًا ـ من المشاهدات المألوفة للطلاب .

وتعتبر الافتراضات التالية أساسًا للملامح الخاصة المستخدمة فى الكتاب :

1 ـ على الطالب أن يكون قادرًا على التعبير بعد أن يعى الهدفين المذكورين آنفًا بطرق متعددة . وأحد الأساليب ، التى تعتبر تقليديًا أساس معظم اختبارات المقرر ، هو القدرة على حل مسائل كمية . أو أن يكون الطالب قادرًا على الوصول إلى إجابات صحيحة لأسئلة نوعية تتضمن تطبيق مبادئ فيزيائية .

2 ـ تقوم القدرة على حل المسائل على القدرة على صياغة أسئلة تحليلية توضح عند الإجابة عليها كيفية الحل . وتتضمن صياغة هذه الأسئلة القدرة على تحديد ما يلى : (1) العوامل الضرورية المعروفة فى المسألة و (2) المبادئ التى تربط بين هذه العوامل المعروفة وتلك المجهولة . ولابد أن يتعلم الطالب **أن السؤال الجيد هو أفضل استجابة ابتدائية لمسألة ما .**

3 ـ يعانى كل الطلاب غالبًا من « المسائل الكلامية » ، وحتى لو استطاع الطالب صياغة الأسئلة المطلوبة فإنه قد لا يكون قادرًا على ترجمتها إلى صيغ رياضية . وبدلاً من النص على أن الرياضيات هى لغة الفيزياء فإننا نؤكد على تنمية الفهم التالى وهو أنه : نظرًا لأن مبادئ الفيزياء تعرَّف بمصطلحات محددة ، لذا **فكل تعريف ومبدأ مطبق على مسألة ما ينشئ معادلة .**

4 ـ أن حل عدد كبير من المسائل المختلفة هو أحد السبل لاكتساب الخبرة فى تطبيق المبادئ .

5 ـ أن تلخيص المادة يعتبر طريقة لتوحيدها والتركيز على العلاقات المتشابكة بين المفاهيم .

6 ـ حيث إن مقرر الفيزياء العادى المبنى على مبادئ الجبر يركز أغلب الوقت على الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية) ، لذا فإن الطالب لا يتعلم سوى القليل عن التطور الذى حدث خلال الأعوام المائة المنصرمة عند الانتهاء من المقرر . إن استيعاب التطبيقات الحالية للفيزياء ودوافع إجراء البحوث المستمر تتطلب التعرض للآفاق الحديثة للتطبيقات . ولابد لهذه الآفاق من أن تصاحب المبادئ الكلاسيكية التى تم تعديلها بالتطورات الحديثة .

التغييرات الموضوعية فى الطبعة السادسة

لازالت هذه الطبعة من الكتاب مقسمة بالأسلوب التقليدى إلى خمسة أجزاء هى :

الميكانيكا

الخواص الميكانيكية والحرارية للمواد ، الاهتزازات والموجات

الكهربية والمغناطيسية

الضوء والبصريات

الفيزياء الحديثة

ومع ذلك فقد تم إجراء التغييرات التالية فى التغطية الموضوعية :

1 ـ لقد أعيد ترتيب الفصول الأربعة الأولى على نسق أكثر تقليدية عما كان فى الطبعة الخامسة . ويقدم الفصل الأول اهتمامًا أكبر بحدود القياسات والحسابات باستخدام الكميات المقاسة . وكجزء من هذا التوجه ، فإن اهتمامًا متزايدًا يتجه نحو ترجمة العبارات الكلامية إلى صيغ رياضية .

2 ـ تم تقسيم الديناميكا الحرارية إلى فصلين : أحدهما حول القانون الأول والآخر حول القانون الثانى . وتم ضم تغطية إضافية عن عمليات الديناميكا الحرارية فى الغازات والحرارات النوعية للغازات .

3 ـ أضيف قسم حول قانون « جاوس » والمجالات الكهربائية الناشئة عن توزيعات متماثلة للشحنات .

4 ـ عند تغطية البصريات الموجية ، فإن الحيود والتداخل أصبحا يسبقان النبيطات البصرية .

الجديد فى هذه الطبعة

نموذج السؤال والإجابة فى الأمثلة المحلولة

لعل أكبر تغير ملحوظ فى هذه الطبعة هو إضافة **حوارات** مصاحبة للأمثلة المحلولة . وعقب تقديم كل مبدأ فيزيائى جديد واستيعابه ، ثم كتابته رياضيًا ، فإنه يتبع بمثال محلول أو أكثر . وبدلاً من اللجوء إلى المدخل المعتاد لشرح الحل للطالب استنادًا إلى خبرة المؤلف والإدراك المتأخر له ، فإن مجموعة من الأسئلة ، التى على الطالب أن يسألها حتى يترجم المسألة إلى شكل قابل للحل ، ترد فى قسم فريد لنموذج السؤال والإجابة . ومن خلال الإجابات على هذه الأسئلة يتم الأخذ بيد الطالب نحو هيكل الحل حيث يدرك كيفية وضع الأسئلة أثناء تطبيق التعريفات والمبادئ .

ولا نزعم أن تتابعًا معينًا للأسئلة هو الفريد من نوعه بالنسبة لمسألة بعينها ـ إذ يمكن استخدام بدائل أخرى ـ وإنما تكون الأسئلة المطروحة هى التى سيقوم الطالب بتوجيهها وهو فى الطريق إلى الحل فى لحظة ما . وإدراك العملية الواضحة لطرح التساؤل يشجع على تنمية الاستيعاب النوعى ويقلل من الميل إلى المحاولات العشوائية باستخدام « صيغ » مختلفة أملاً فى أن تؤدى إحداها إلى الحل بطريقة سحرية .

مفاهيم الفيزياء الحديثة

يختتم الآن ثلث الفصول الخاصة بالفيزياء التقليدية (الكلاسيكية) بقسم يطلق عليه منظور حديث ، يمد الطالب بلمحة عن النحو الذى عدّلت به الفيزياء فى القرن العشرين المبادئ الكلاسيكية الواردة فى تلك الفصول . ومن أمثلة ذلك « الكتلة عند السرعات العالية » فى الفصل الثالث (قوانين نيوتن للحركة) و « والحد الأدنى لكمية الحركة الزاوية » فى الفصل الثامن (الشغل والطاقة وكمية الحركة الدورانية) . كما تستكشف حدود صلاحية فروض الفيزياء الكلاسيكية ، وتصف بعض مفاهيم النظرية النسبية ونظرية الكم ونزعم أن هذه اللمحات من عالم الفيزياء الحديثة داخل سياق المبادئ الكلاسيكية المناظرة جديرة بأن تشعر الطالب بالحيوية المتواصلة للفيزياء .

وإذا ما ظلت الفيزياء تقدم بحيث تغطى الموضوعات الكلاسيكية محكومين فى ذلك بعنصر الوقت فإنها ستبدو كموضوع مشرف على الموت .

المقالات الزائرة

لاشك أن إضافة بعض السير التاريخية التقليدية مبهرة فى ذاتها ، ولكننا بدلاً من ذلك توجهنا بالسؤال إلى عدد من الفيزيائيين المعاصرين لكى يسهموا بتقديم سيرة ذاتية موجزة لهم ، مع التأكيد على سبب اختيارهم لأن يصبحوا فيزيائيين . وعما يدفعهم للاستمرار فى هذا المجال . وقد أطلقنا على هذه المقالات « الفيزيائيون يعملون » وننوى نقل الجانب الشخصى والإنسانى لرجال وسيدات لا يزالون يعملون بجد لاكتشاف آفاق وحدود المعرفة وما يليها من تطبيقات إلى الطلاب .

الخلافات العظيمة

يحتوى الكتاب على ثلاث مقالات ترد تحت عنوان الخلافات العظيمة فى الفيزياء . وهى بمثابة نقوش زخرفية تاريخية صغيرة توضح أن فهمنا المعاصر للفيزياء إنما يقوم على الصراع بين الأفكار المتنافسة والملاحظات التجريبية ، والذى عادة ما يمتد عبر فترات زمنية طويلة . والموضوعات المثارة هى الخلافات حول الأجسام الساقطة وطبيعة الحرارة وطبيعة الضوء . ويتم التأكيد على دور الأسئلة النقدية فى حسم نتيجة هذه الخلافات أو التى تطرح على هيئة تجارب تأكيدية .

ملامح أخرى

من الطبيعى أن يتم الاحتفاظ بنقاط القوة فى الطبعات السابقة ومن ذلك ما يلى :

التأكيد على التحليل الإدراكى (الواعى)

ومن خلال السرد فى كل فصل يظل الطالب معرضًا باستمرار للسؤال التالى « لماذا ؟ » أو « هل يمكنك تفسير هذا ؟ » حيث يضع المؤلفان بعض التأكيدات المبنية على الأفكار التى نشأت سابقًا . ويختتم كل فصل بعدد من الأسئلة الإدراكية التى يطلق عليها أسئلة وتخمينات . وتؤكد هذه الملامح أهمية تنمية المقدرة على تطبيق مبادئ الفيزياء بصورة نوعية . وهذا الواجب أكثر صعوبة بالنسبة للطالب من إيجاد الحل الشكلى لمسألة رياضية ما . وامتلاك ناصية هذه المقدرة يعتبر أساسًا ضروريًا للحل الناجح للمسائل ، كما يعتبر مؤشرًا رئيسيًا للفهم الحقيقى .

أمثلة وتدريبات محلولة

لقد أوضحنا سالفًا أن نموذج الأمثلة المحلولة قد تغير ليتضمن حوارًا بين المدرس والطالب . وفضلاً عن ذلك فإنه فى نهاية معظم الأمثلة تقدم صورة متعلقة بها يطلق عليها تدريب حيث لا يعطى سوى الجواب النهائى وهكذا يكون لدى الطلاب فرصة مواتية لاختبار فهمهم للحل السابق .

دليل الدراسة الذاتي

يحتوى كل فصل على موجز شامل للتعريفات والمفاهيم والتعبيرات الرياضية التى قدمت فى الفصل . والسمة المهمة والفريدة لهذا الموجز هو قسم **خلاصة** ، حيث تقدم مسائل مهمة متوقعة ويقدم معها شرحها . وتقدم هذه الموجزات المستفيضة إلى الطالب دليلاً دراسيًا ذاتيًا يبين بوضوح مدى ارتباط المبادئ المطروحة فى الفصل .

أهداف التعلم

وتُلحق أهداف التعلم التفصيلية بكل فصل من فصول الكتاب ، حيث تقع عادة عند نهاية الفصل بحيث توفر مع الأسئلة والتخمينات ، وكذا موجزات الفصول ، مسحًا مركزًا وشاملاً ومناسبًا للطالب .

مجموعات مستفيضة من المسائل

تحتوى هذه الطبعة الجديدة على ما يقرب من خمسين فى المائة زيادة فى عدد المسائل الواردة فى نهاية كل فصل عن الطبعة السابقة . ومعظم المسائل جديدة كما تمت مراجعة الكثير من المسائل التى احتفظ بها من الطبعة السابقة . وتتوزع المسائل على أقسام الفصل وتتدرج من حيث صعوبتها إلى ثلاثة مستويات . وبالإضافة إلى هذا فإن كل فصل يحتوى على قسم به مسائل إضافية تنطوى على سمة أكثر تكاملية من المسائل الموزعة على الأقسام .

الرسومات التوضيحية والصور

تحتوى الطبعة الجديدة على ما يزيد عن خمسمائة رسم ومخطط بيانى وكلها بالألوان ومن السهل فهمها . . وهى توضح المفاهيم الجديدة المطروحة خلال الكتاب . وتعرض مئات الصور الفوتوغرافية على الطالب أمثلة للأجهزة وتطبيقاتها مع إيضاح الطرق التى بواسطتها تصبح مبادئ الفيزياء وثيقة الصلة بالحياة اليومية وتشكل جزءًا حيويًا منها .

الملاحق المدعمة للطبعة السادسة

لقد أعدت المواد الثانوية التالية لكى تدخل فى بناء الطبعة الأخيرة من أساسيات الفيزياء .

ويحتوى **دليل مصادر المعلم** والذى أعده باتريك بريجز من سيتادل وجون سوينر عن جامعة إنديانا الحكومية على :

- مقترحات بمحاضرات .
- مسائل إدراكية ومسائل كمية يمكن عمل نسخ منها وتخصص للواجبات المنزلية أو للمناقشة داخل الفصل الدراسى أو لكليهما .
- تطبيقات طبية وصحية وتشمل أمثلة من الدراسة الإعدادية الطبية والبيولوجيا (علوم الحياة) ، وعلوم البيئة والعمارة .
- مقترحات للأنشطة المنظمة للدراسات الجماعية بما فى ذلك « التجارب المنزلية » التى يمكن إجراؤها باستخدام معدات شائعة ومحدودة .

- قائمة بشرائط الفيديو ، والأسطوانات المدمجة (سي‌دى) وبرمجيات الكومبيوتر ، ذات الصلة الوثيقة بمقررات الفيزياء بالكليات .
- دليل المعلم إلى « **الفيزياء وهى تعمل** » وهو عبارة عن أسطوانة فيديو تقدمها دار ماكجروهيل للنشر (انظر أسفل) .

ويقدم **دليل الحلول** الذى أعده ف.ك. ساكسينا من جامعة « بيرود » للمعلمين حلولاً شاملة لجميع المسائل الواردة فى نهاية كل فصل بالكتاب . كما ستتوافر الرقائق الشفافة الملونة المستخدمة مع جهاز عرض اللوحات الشفافة لكثير من الأشكال الواردة بالكتاب .

كما تعتبر أسطوانة الفيديو : « **الفيزياء وهى تعمل** » التى تقدمها « فيديو ديسكفرى » برنامجًا شاملاً صمم ليعين الطلاب على استيعاب وتصور المبادئ الفيزيائية . كما تدعم أسطوانة الليزر ذات الوجهين (للتشغيل العيارى) CAV ببطاقة مرجعية سريعة ودليل للصور يعمل بنظام قضبان الشفرة (باركود) ومفهرس بالأسماء وعناوين المفاهيم وأرقام الأطر . وهناك صحيفة تنسيق فى دليل مصادر المعلم وبها قوائم بالأقسام الواردة فى أسطوانة الفيديو « الفيزياء وهى تعمل » ويمكن الاستفادة منها فى مقررات الفيزياء بالكليات .

ويتوفر أيضا بنك للاختبارات أعده جون سنايدر (من جامعة جنوب كونيكتيكت) ويحتوى على ما يزيد عن ألف مسألة ذات خطوات متعددة وعلى هيئة « اختيار من متعدد » وهذا البنك متاح على هيئة كتيب مطبوع أو كبرمجيات software تعمل على أجهزة كومبيوتر أى . بى . أم . أو ماكينتوش .

اعتراف بالجميل

إن عددًا كبيرًا جدًا من الناس مسئولون عن ظهور الطبعة السادسة من كتاب أساسيات الفيزياء إلى حيز الوجود . وتظهر على الصفحة القادمة قائمة بأسماء الأساتذة الذين قاموا بمراجعة هذه الطبعة .

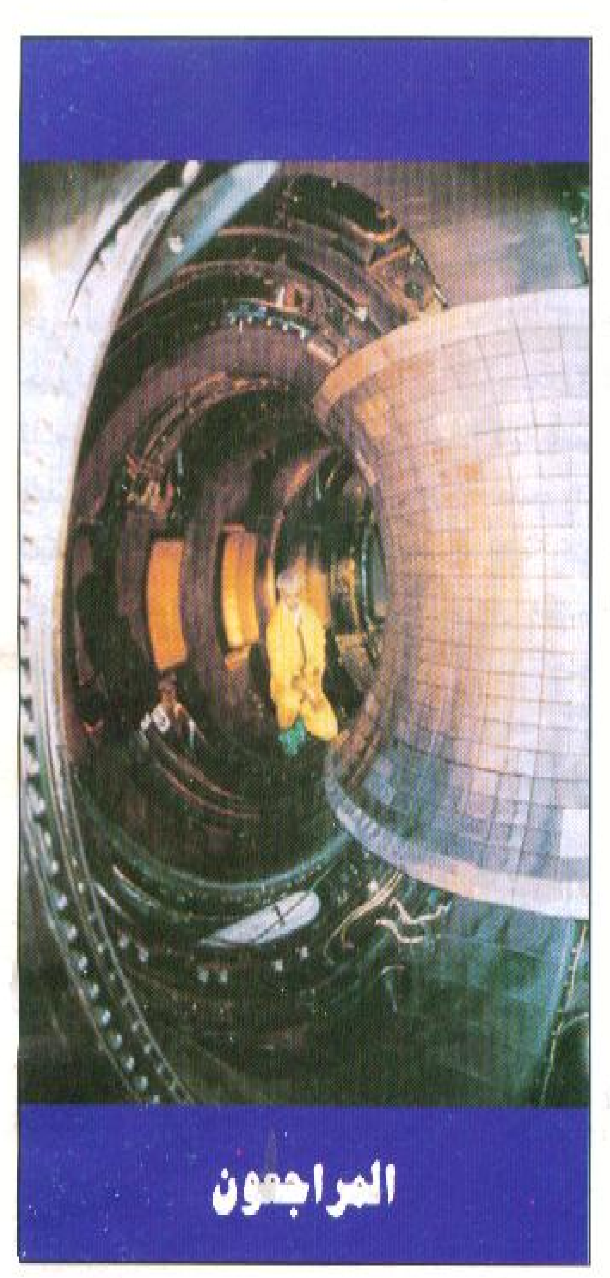
كما نود أن نوجه الشكر إلى الدكاترة جون هارلاندر ، مارك نوك ، ويتشارد شوينبرجر من جامعة سانت كلاود للمناقشات التوضيحية حول الكثير من النقاط التعليمية . وقد أنجز الدكتور ف. ك. ساكسينا عملاً مثيرًا للإعجاب بوضع معظم المسائل الجديدة وتقديم دليل حلول المسائل للكتاب كله .

ونحن ممتنون للعاملين الأكفاء بدار ماكجروهيل ، الذين ساعدونا ودعمونا بالعديد من الوسائل ، بما فى ذلك تسامحهم إزاء عدد مرات التأخير التى فرضتها أعباؤنا المختلفة . ومن أولئك الذين يستحقون ذكرًا خاصًا ، آن. س. دافى دافيد ، أ. دامسترا ، صافرا نيمرود ، سيلفيا وارين ، جوان أوكونور . وقد قضت إيرين نيونز العديد من الساعات وكثيرًا من المداد الأحمر فى جعل المخطوطات الأولية للكتاب فى صورة مقروءة .

وعلى الرغم من جميع الجهود الذى بذلت لتلافى الأخطاء ، إلا أن بعضها سيظل قائمًا ولذا فإننا ندعو إلى تنبيهنا إلى التعليقات والتصويبات حتى يمكن تحسين الطبعات المستقبلية للكتاب .

فريدريك . ج . بوش

دافيد . أ . جيرد

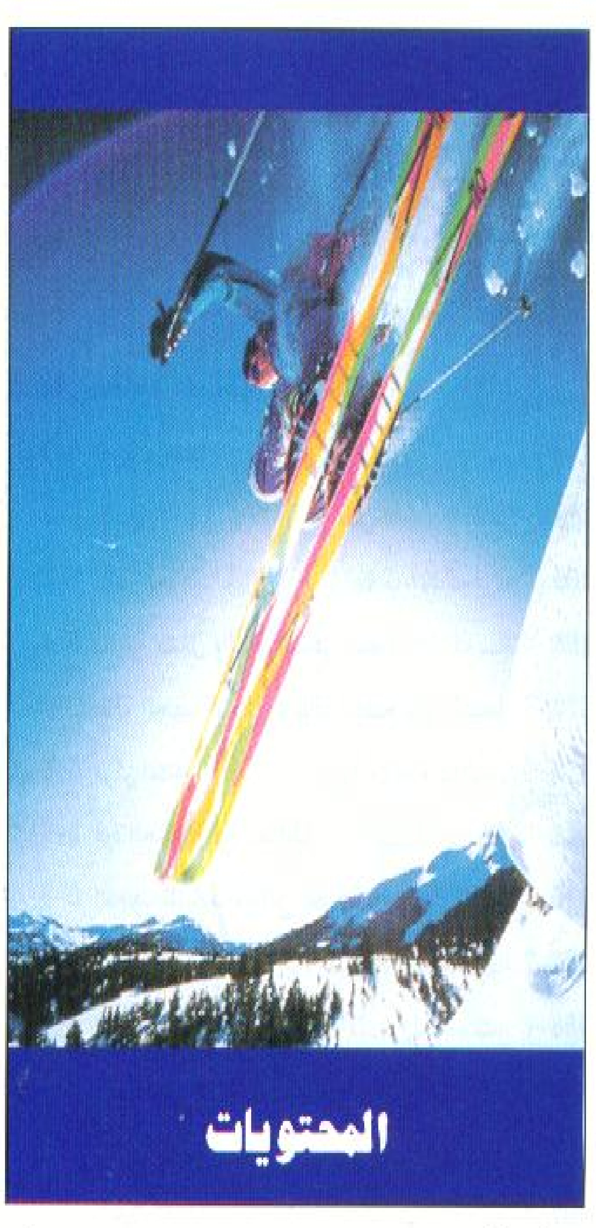


32

أستاذًا للفيزياء راجعوا هذا الكتاب

جورج س. ألكسندراكيس	جامعة ميامى
ريتشارد بيدل	كلية شمال هانيبن
والتر بيفنسون	جامعة ولاية ميتشجان
كينيث براون	كلية كين
دارى س. كارلستون	جامعة أوكلاهوما المركزية
ر.م. كاتشينجز	جامعة هاوارد
لارى كولمان	جامعة أركانسو ـ ليتل روك
برنت كورنستابل	الأكاديمية العسكرية للولايات المتحدة ـ وست بوينت
ملفين دافيدسون	جامعة واشنطون الغربية
بيتر . ج . ديبرونر	جامعة إلينوى
مهرى فداقى	جامعة مسيسيبى الحكومية

كايل فورنباش	جامعة إنديانا ـ جنوب شرق
تشارلز جيل	جامعة ماكجيل
مايكل جريدى	جامعة ولاية نيويورك ـ فريدونيا
إيرا . ل . هوك	جامعة كاميرون
أ. توماس هنكل	كلية واجنر
جورج ليمبرج	كلية مقاطعة باسايك للمجتمع
جيرارد . ب . ليتز	جامعة دىبول ـ شيكاغو
وليام . م . ماكورد	كلية فالنسيا للمجتمع
وليام ماسانو	جامعة ولاية نيويورك ـ كلية ماريتايم
مايكل ماتكوفيتش	كلية أوكتون للمجتمع
جون / و. ميلتون	جامعة دى بول
مارفين موريس	جامعة سان خوزيه الحكومية
ميل أوكس	جامعة تكساس فى أوستن
أ. و. بروهوفسكى	جامعة بيردو
كريستوفر رودى	جامعة بيردو
فريدريك . هـ. س. شولتز	جامعة ويسكونسين ـ أوكلير
بول سوكول	جامعة ولاية بنسلفانيا
كارى . ا . ستروناك	جامعة ولاية فيرجينا
جون . ا . سويز	جامعة ولاية إنديانا
فرانكلين . د . ترامبى	كلية ديزموينز للمجتمع
ريتشار ڤاوتر	جامعة واشنطن الغربية



المحتويات

الفصل الأول : مقدمة



الجزء الأول : الميكانيكا

الفصل الثانى : الحركة ذات العجلة المنتظمة

الجزء الثالث : الكهربية والمغناطيسية

الفصل العشرون : الحث الكهرومغناطيسى

الفصل الحادى والعشرون : دوائر التيار المتردد

الجزء الرابع : الضوء والبصريات

الفصل الثانى والعشرون : الموجات الكهرومغناطيسية

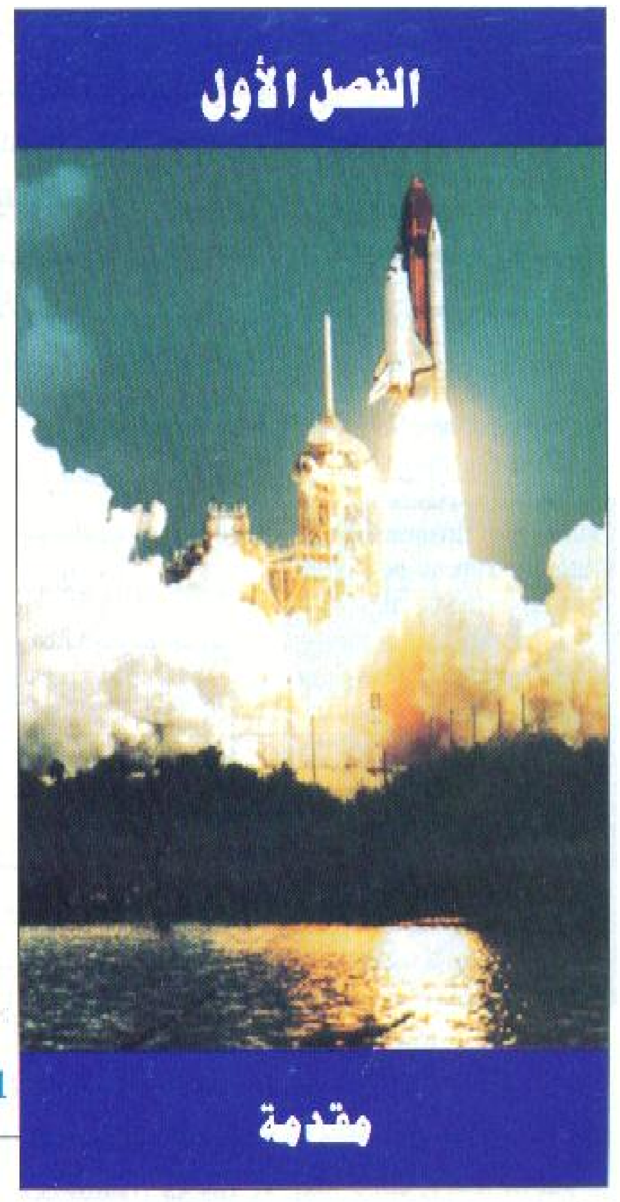
الجزء الخامس : الفيزياء الحديثة

الفصل السادس والعشرون : ثلاثة مفاهيم ثورية

الفصل السابع والعشرون :

مستويات الطاقة والأطياف الذرية

الفصل الثامن والعشرون : النواة الذرية



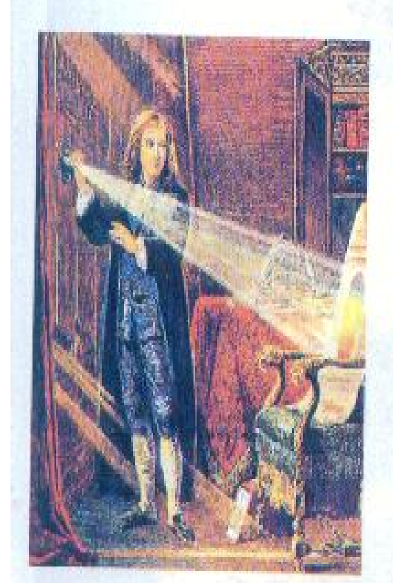
1-1 ما هي الفيزياء ؟

لدينا نحن البشر ردود فعل متباينة تجاه العالم الذى نعيش فيه جميعًا . فالفنان فينا يعجب أيما إعجاب بغروب الشمس ويتمنى لو أمكننا التعبير عن جماله فى إبداعاتنا الفنية ، والشاعر فينا يحاول أن يجد الكلمات المناسبة لوصف ذلك الجمال فى شعره . وهناك جانب آخر قد يتميز به الفيزيائى ، فهو يهتم بمدى بعد الشمس عن الأرض ، ومدى كبرها ، وكيف تولد كل هذا الضوء والحرارة . وبمجرد طرح هذه الأسئلة سيكون من الصعب أن نتوقف . وقد يدفعنا الجانب الفلسفى أو الدينى فينا أن نسأل : « ما معنى الغروب ؟ » لكن الحقيقة أن لدينا نحن البشر القدرة على ممارسة جميع ردود الفعال هذه بدرجات مختلفة فى نفس الوقت ، فعندما نقول أن هذا فنان وذاك شاعر أو فيلسوف أو فيزيائى فإننا نوضح ونؤكد موهبته فى أحد هذه الاتجاهات .

فالفيزيائيون ببساطة إذن هم هؤلاء الناس الذين تثيرهم الأسئلة عن كيفية عمل وأداء العالم الطبيعى من حولنا ويحاولون بالتالى البحث عن إجابات لها . وسوف يجد القارئ فى مواضع كثيرة بهذا الكتاب مقالات شخصية بقلم بعض العلماء يوضحون فيها كيف

أصبحوا فيزيائيين ولماذا يستمر افتتانهم بمهنتهم المختارة .

الفيزياء إذن هى ذلك الفرع من المعرفة الذى يعطى إجابات منظمة عن أسئلتنا حول العالم الطبيعى ، كما أنها تمثل عملية الحصول على هذه الإجابات والتى تعرف عادة بالطريقة العلمية . والأداتان الأساسيتان فى الفيزياء هما المنطق والتجريب . وما مختلف الاختراعات الحديثة من الليزر إلى رقائق الراديو المتكاملة ، ومن المولد الكهربائى إلى المحرك النفاث ؛ ومن أجهزة الراديو والتليفزيون إلى الأدوية والأجهزة المستخدمة لانقاذ الحياة وغيرها ، إلا إنجازات قد تحققت بفضل الفضول العلمى الذى نعيش فى ظلاله كل لحظة من لحظات حياتنا .



نيوتن ومعه منشور .

إن جهودنا لفهم العمليات الطبيعية عن طريق الجمع بين التفكير المنطقى والتجريب المحكم فيما يسمى **بالطريقة العلمية** تمثل فصلاً جديدًا فى التاريخ الإنسانى . فقبل حوالى عام 1600م كانت الإجابات المتعلقة بالحقيقة والزيف تتحدد غالبًا بأمور تمليها اعتبارات سياسية أو دينية . وقد كان لجهود أولئك العلماء العظام أمثال جاليليو جاليلى وروبرت بويل وإسحق نيوتن وغيرهم الفضل فى تقديم هذه الطريقة العلمية إلى العالم ، هذا بالرغم من الأخطار الشخصية الكبيرة الناتجة عن صدامهم مع السلطات الدينية والسياسية فى ذلك الوقت .

هناك افتراضان أساسيان خلف إيماننا بالطريقة العلمية كأسلوب لفهم الطبيعة : الأول أن النتائج العلمية **قابلة للاستعادة** . وقابلية الاستعادة تعنى أن نفس الظروف تعطى دائمًا نفس النتائج العلمية فى نفس التجربة بصرف النظر عن الذى يقوم بإجرائها . الافتراض الثانى هو أن الطبيعة خاضعة لمبدأ **السببية** ؛ أى أن العلاقات الارتباطية بين السبب والنتيجة تحدد ما يحدث نتيجة لظروف أو شروط ابتدائية معينة . وبدون هذين المبدأين ستكون الملاحظة العلمية عديمة الفائدة لأن النتائج لن يمكن تعميمها للتنبؤ بالأنماط الأساسية للسلوك ، وعندئذ سنحيا فى كون مشوش غير منتظم ، بل أنه سيكون غير قابل للفهم من ناحية المبدأ .

تعتبر الفيزياء أكثر العلوم أساسية . فالفيزياء علم كمى هدفه وصف جميع الظواهر فى العالم الطبيعى بدلالة عدد قليل من العلاقات الأساسية بين خواص المادة القابلة للقياس والطاقة . هذه العلاقات الأساسية تسمى **قوانين الفيزياء** ، وهى صيغ تتميز بدرجة عالية من العمومية ، كما أنها مشتقة من عدد هائل من الظواهر وتنطبق عليها . ولاستنباط القوانين الكمية يتحتم تعريف الخواص المتضمنة فيها بطريقة تسمح بقياسها . هدف الفيزياء إذن هو التعبير عن العلاقات الأساسية - أى هذه القوانين - فى **صورة رياضية** . هذا يمكن الفيزيائيين من استخدام القواعد المنطقية لعلم الرياضيات لتطبيق القوانين على حالات محددة ، والحصول بالتالى على نتائج كمية .

فى الطريقة العلمية تبدأ القوانين كأفكار ، أو **نظريات** ، يجب اختبار صحتها بالتجربة العلمية . فإذا ما أيدت التجربة التنبؤات الكمية للنظرية فإن هذه النظرية تقوى وتدعم ، أما النظريات التى تتناقض تنبؤاتها مع التجربة فإنها تنبذ تمامًا . وفى نهاية

الأمر سوف تكتسب أكثر النظريات عمومية فى التطبيق صفة القانون الفيزيائى . هذا وتحتوى الفيزياء الآن على فروع كثيرة ، منها الميكانيكا والبصريات والفيزياء الذرية والفيزياء النووية والديناميكا الحرارية والكهربية والمغناطيسية والصوتيات والميكانيكا الكمية والنسبية . وتجدر الإشارة هنا إلى أن بعض القوانين ، مثل قانون بقاء الطاقة ، تستخدم فى جميع فروع الفيزياء ، ولكن البعض الآخر يستخدم استخدامًا محدودًا رغم صحتها العامة كسابقاتها تمامًا .

لنبدأ الآن رحلتنا فى عالم الفيزياء بنظرة إلى بعض الأدوات التى سوف نحتاج إليها فى الطريق . وحيث أن الفيزياء فى صميمها علم رياضى ، فإن هذا المقرر يتطلب أن يكون القارئ ملمًا إلمامًا كافيًا بعلم الجبر على مستوى الدراسة الثانوية وكذلك بعض حساب المثلثات البسيط . وسوف يخصص هذا الفصل وكذلك الملحق 3 لإمداد القارئ بنبذة مختصرة للرياضيات التى سوف يقابلها فى دراسته للفيزياء .

1-2 العد والقياس : الدقة والضباطة

أبسط طريقة للتقدير الكمى هى **العد** . هذه الطريقة قابلة للتطبيق عندما نتعامل مع وحدات متميزة مستقلة كالتفاح والبرتقال والأشخاص والذرات . ومن حيث المبدأ ، يعتبر العد عملية **ضبيطة** (أو مضبوطة) للتقدير الكمى لأننا نستخدم أعدادًا صحيحة للتعبير عن الكمية . ومن الطبيعى أن تكون هناك حدود عملية للضباطة عندما تواجهنا أعداد كبيرة من الأشياء كعدد الناس فى الولايات المتحدة أو عدد الذرات فى مادة ما . وفى مثل هذه الحالات يجب أن نرضى بمعرفة العدد فى حدود مقبولة من عدم اليقين . ومع ذلك فإننا نعلم أنه يمكننا من ناحية المبدأ معرفة العدد بالضبط .



شكل 1-1 :
يلاحظ أن طول الكتاب لأقرب علامة على المسطرة هو 26 cm ، لكن الطول الحقيقة يمكن أن يقع بين 25.5 cm و 26.5 cm وعليه فإن ضباطة القياس تقع فى مدى قدره 1 cm . ويبين حدّ الضباطة فى هذه الحالة بكتابة 26 ± 0.5 cm .

الطريقة الأخرى للتقدير الكمى هى **القياس** . ولكن القياس ، بخلاف العد ، عملية غير ضبطية من حيث المبدأ . فعندما نقوم بالقياس فإننا لا نستعمل الأعداد الصحيحة لتعيين الكمية ، ولكننا نستخدم العلامات الموجودة على المسطرة أو الترمومتر مثلا ، أو دقات الساعة لقياس مقدار الطول أو درجة الحرارة أو الزمن . جميع هذه العلامات أو الدقات لها حد ذاتى أصيل من **الضباطة** حتى ولو تحول القياس إلكترونيًا إلى الصورة الرقمية . ويتعين حد الضباطة بتصميم وتركيب جهاز القياس ، ومهما كان حرصنا أثناء القياس فإننا لن نحصل أبدًا على نتيجة أكثر ضباطة من حد جهاز القياس المستخدم . وكتوجيه إرشادى عام يقال أن حد ضباطة جهاز قياس معين يساوى نصف أصغر قسم من أقسام القياس . وعندما تقوم أنت بإجراء قياس ما فإنك تقرأ الكمية المقاسة لأقرب علامة على الجهاز ، وعندئذ سوف تقع القيمة « الحقيقية » لهذا القياس فى مدى قدره نصف أصغر قسم من أقسام الجهاز فوق أو تحت العلامة المبينة .

حد ضباطة جهاز قياس ما هو $\pm\frac{1}{2}$ أصغر قسم من أقسام القياس يستطيع الجهاز قياسه .

بناء على ذلك فإن الضباطة الحدية لسطرة مدرجة بالمليمترات (mm) تساوى ±0.5 mm ، بينما القدمة ذات الورنية التى تعطى القيمة مباشرة لأقرب 0.1 mm ضباطتها الحدية تساوى ±0.05 mm (انظر الشكل 1-1) . كذلك فإن ساعة الإيقاف المدرج وجهها على فترات قدرها نصف الثانية (0.5 s) لها ضباطة قدرها ±0.5 s ، وساعة الإيقاف الرقمية التى تقرأ الزمن لأقرب 0.1 s ضباطتها الحدية ±0.05 s .

النوع الآخر من عدم اليقين فى القياس مرتبط بالتصميم غير الصحيح أم المعايرة غير الصحيحة للجهاز ، كما أنه قد ينشأ عن القراءة غير الصحيحة للنتيجة . وتسمى مثل هذه الأخطاء **بالأخطاء الرتيبية** ، وهى تؤدى إلى أن يكون القياس أكبر أو أصغر من القيمة الحقيقية بمقدار ثابت ، ويوصف القياس حينئذ بأنه غير دقيق .



تستخدم أجهزة عديدة لقياس الكميات الفيزيائية المختلفة كالطول والزمن ودرجة الحرارة . وبعض هذه الأجهزة تناظرية والبعض الآخر رقمية ، ولكن لها جميعها حدودا معينة للضباطة .

الدقة هى مدى اختلاف القيمة المقاسة عن القيمة الحقيقية بسبب الأخطاء الرتيبية . ويلاحظ هنا أن العناية الشديدة بتصميم الجهاز ومعايرته ، والحرص الكبير عند القراءة يمكن أن يقلل الأخطاء الرتيبية إلى مستوى من عدم الدقة أصغر من حد ضباطة الجهاز .

وأخيرًا فإن القياسات المتعددة لنفس الكمية باستخدام نفس الجهاز تختلف فيما بينها عادة بمقادير أكبر من ضباطة الجهاز . مثل هذه الأخطاء تسمى **الأخطاء العشوائية أو الأخطاء الإحصائية** . وهى أخطاء تسببها تغيرات الخاصية الفيزيائية المقاسة نفسها ، كالتغيرات فى درجة الحرارة والجهد الكهربى وضغط الغاز وما شابه ذلك . والأخطاء الإحصائية لا يمكن التخلص منها تمامًا ، ولكن يمكن تقليلها بزيادة عدد القياسات ، كما يمكن حساب تأثيرها على دقة الكمية المقاسة بالتحليل الإحصائى . لكننا لن نستخدم التحليل الإحصائى فى هذا الكتاب .

1-3 الأبعاد والوحدات المستخدمة فى القياس

عند قياس كمية فيزيائية ما علينا أن نحدد **نوع** الخاصية الفيزيائية التى تقم بقياسها . هل نريد تعيين طول حمام السباحة مثلاً ، أم نريد تعيين الزمن اللازم لسباحته مرة

واحدة . هناك سبعة أنواع أساسية فقط من الخواص الفيزيائية اللازمة لوصف جميع القياسات الفيزيائية هذه الخواص ، وتسمى **الأبعاد** ، هي الطول والكتلة والزمن ودرجة الحرارة والتيار الكهربى وعدد الجسيمات والشدة الضيائية . أما الكميات الفيزيائية الأخرى التى نتعامل معها ، كالقوة والطاقة وكمية التحرك ، فيمكن اشتقاقها من هذه الأبعاد الأساسية السبعة .

من الضرورى تعريف كمية معيارية لكل من الأبعاد الفيزيائية الأساسية . هذه التعريفات اختيارية ، ولكن كلاً منها مبنى على أساس قياس فيزيائى ذى ضباطة عالية . وهناك اتفاقية دولية بشأن تعريف كل من الكميات المعيارية السبع وكذلك مواصفات وتصميمات التجارب المستخدمة لقياسها .

بعد تحديد نوع الخاصية المراد قياسها ستكون مهمتنا الثانية أن نختار نظامًا **لوحدات القياس للتعبير عن الكمية التى نقوم بقياسها** . وقد استخدمت عدة أنظمة للوحدات فى أوقات وأماكن مختلفة للتعبير عن الكميات المقاسة بالأبعاد السبعة الأساسية . ولكن يستخدم فى العالم الآن نظامان أساسيان فقط من أنظمة القياس . وأكثر هذين النظامين استخدامًا فى الوقت الحالى ، وهو النظام المستخدم فى المجال العلمى على وجه الحصر تقريبًا ، هو النظام العالمى للوحدات *(SI) . أما النظام الثانى ، وهو الشائع فى الولايات المتحدة ، فهو النظام البريطانى (بالرغم من أنه لم يعد النظام المعتمد رسميًا للاستخدام فى بريطانيا العظمى) . والنظام المستخدم فى هذا الكتاب هو نظام الوحدات SI ، وإن كنا سنعقد أحيانا بعض المقارنة مع النظام البريطانى .

جدول 1-1 :

الأبعاد والوحدات الأساسية فى النظام SI .

البعد	الوحدة	الرمز
الطول	المتر	m
الكتلة	الكيلو جرام	kg
الزمن	الثانية	s
درجة الحرارة	الكلفن	K
التيار الكهربى	الأمبير	A
عدد الجسيمات	المول	mol
الشدة الضيائية	الكاندلا	cd

يوضح الجدول 1-1 الأبعاد الأساسية السبعة معبرًا عنها فى نظام الوحدات SI . أما الكميات الفيزيائية الأخرى والتى تمثل **تركيبات** من الوحدات الأساسية فهى الوحدات SI **المشتقة** ، وقد أعطى العديد منها أسمائها الخاصة . ومن أمثلة الوحدات المشتقة يمكن ذكر الجول (للطاقة) والنيوتن (للقوة) . هذا ويحتوى الغلاف الأمامى للكتاب على قائمة كاملة تقريبا للوحدات SI الأساسية والمشتقة . وسوف نقوم بتعريف بعض الوحدات الخاصة على نحو أكثر تفصيلاً عند ورودها فى مواضعها المناسبة بالكتاب .

1-4 الحساب بالوحدات والتحويل بين أنظمة الوحدات

يتضمن حساب الوحدات المقاسة دائما **عمليتين** متميزتين : (1) إجراء الحساب العددى ، (2) حساب وحدات الكمية الناتجة . وفيما يتعلق بالعملية الأخيرة من المهم مراعاة أن **الوحدات فى حساب ما تعامل نفس معاملة أى كميات جبرية أخرى** .

وهكذا فإن قسمة 60 miles (mi) على 2 hours (h) تعطى

* يأتى الاختصار SI من الاسم الفرنسى Le Systéme International d'Unités .

$$\frac{60\ \text{mi}}{2\ \text{h}} = 30\ \text{mi/h}$$

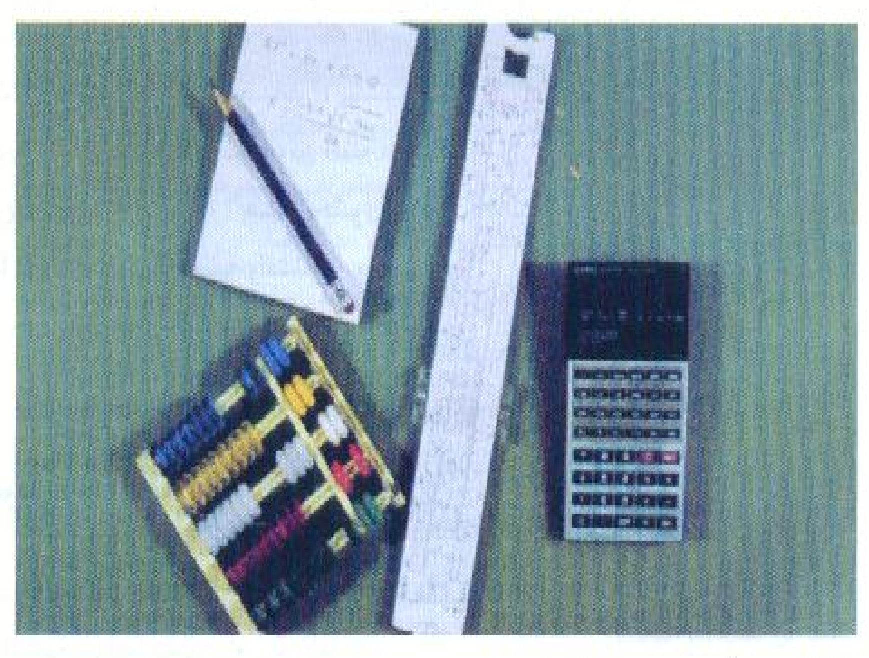
وبالمثل فإن ضرب 3 kilograms (kg) فى 12 meters per second (m/s) يعطى

$$(3\ \text{kg})(12\ \text{m/s}) = 36\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

والوحدات المستخدمة لقياس بُعد ما فى أنظمة الوحدات المختلفة تسمى عادة بأسماء مختلفة وتمثل مقادير مختلفة لذلك البعد . فمثلاً ، يقاس الطول بالمتر فى النظام SI وبالياردة فى النظام البريطانى ، ويستخدم الكيلو جرام (النظام SI) والسلج (النظام البريطانى) كلاهما لقياس الكتلة . ومع ذلك يمكننا دائمًا تحويل أى قياس من نظام إلى آخر باستخدام العلاقات التكافؤية المناسبة ، والتى تسمى **معاملات التحويل** . هذا ويحتوى الغلاف الأمامى الداخلى على بعض معاملات التحويل الشائعة الاستعمال .

وتنشأ أخطاء الحساب غالبًا بسبب استخدام وحدات متضاربة أو الاستخدام غير الصحيح لمعاملات التحويل . ولتلافى حدوث مثل هذه الأخطاء عند التحويل من نظام وحدات ما إلى آخر يجب ملاحظة أن النسبة التكافؤية للوحدتين تساوى الوحدة دائمًا . فمثلاً ، إذا قسمنا طرفى المعادلة 1.00 inch (in) = 2.54 centimeters (cm) على 2.54 m سنجد أن :

$$\frac{1.00\ \text{in}}{2.54\ \text{cm}} = \frac{2.54\ \cancel{\text{cm}}}{2.54\ \cancel{\text{cm}}} = 1$$



الأجهزة الحاسبة المبينة بالصورة هى : المعداد (عدد البكر) ، قلم وورقة ، مسطرة حاسبة وآلة جيب حاسبة . هل يمكنك تحديد cpu (الوحدة الحاسبة المركزية) للأجهزة الثلاثة الأولى .

وحيث أن 1.00 in/2.54 cm = 1 ، يمكننا استعمال معامل التحويل هذا ـ مع مراعاة أن ضرب أى كمية فى 1 لا يغيرها ـ للتحويل من الوحدات المترية (السنتيمترات إلى البريطانية (البوصات) . وهكذا فإن طولا قدره 17.3 cm يكافئ :

$$(17.3\ \text{cm}) \times (1.00\ \text{in}/2.54\ \text{cm}) = 6.81\ \text{in}.$$

لاحظ أن استخدامنا لمعامل التحويل هـذا **لا** يعنـى أن 1 = 1/2.54 . تذكّر أننا نجرى حسابا **بالوحدات** وليس مجرد الأعداد . لاحظ أيضا أن النسبة 1.00 in/2.54 cm والنسبة 2.54 cm/2.54 cm كلتيهما بدون أبعاد (طول / طول) ، ومن ثم فإن النتيجـة تكـون عـددًا صرفًا (**ومضبوطًا**) وهو 1 . وعليه فإن ضرب أى كمية مقاسة فـى نسبة معامل تحويـل ما يؤدى إلى تغيير وحدات هذه الكمية وتعديل القيمة العددية إلى الوحدات الجديدة . وما عليك إذن إلا أن تختار الوحدات التى تريـد التخلص منـها (اختصارهـا) والوحـدات التـى تريـد إحلالـها محلـها . فمثلاً ، لتحويل 20.0 قدمًا (ft) إلى أمتار (m) :

$$20.0\,\cancel{ft} \times \frac{0.305\,m}{1.00\,\cancel{ft}} = 6.10\,m$$

لاحظ أن وحدات القدم (ft) تختصر جبريًـا وتبقـى وحـدات الأمتـار (m) وحدهـا . أمـا الجزء العددى فى الحساب فيقوم بتعديل عدد الأقدام الأصلى إلى العدد الصحيح من الأمتار .

بالمثل ، لتحويل سرعة قدرها 60.0 mil/h إلى m/s :

$$60.0\,\cancel{mi}/\cancel{h} \times \frac{1610\,m}{1.00\,\cancel{mi}} \times \frac{1.00\,\cancel{h}}{3600\,s} = 26.8\,m/s$$

وهنا يجب التنويه إلى أن تتبع الوحدات فـى معادلة ما وإجـراء التحويلات الصحيحة يمثلان اثنين من أهم الواجبات فى الحسابات الفيزيائية . كذلك عليك أن تتذكر أن :

جميع الحدود فى أى معادلة يجب أن يكون لـهما نفس الوحدات .

ونحـن نعـنى بكـلمة **الحد** هنـا أى كمية تجـمع أو تطـرح فى المعادلة . وعلى هـذا الأساس فإن وحدات أى من طرفى معادلة ما يجب أن تكون هى نفس وحدات الطرف الآخر .

1-5 الأرقام المعنوية فى الحسابات

حيث أن لكل أجهزة القياس حد ضباطة معين ، ونظرًا لأن الأخطاء الإحصائية غالبًا ما تتواجد ، فإن هناك حدًا معينًا ما لعدد الأرقام المعروفة يقينا فى نتيجة كـل قيـاس . وتسـمى الأرقام المعروفـة يقينًا **بالأرقـام المعنويـة** . ومـن ثـم فعنـد قيـامك بحـل مسـألة فيزيائية معينة يجب عليك أن تستخدم العدد الصحيح من الأرقـام المعنويـة للتعبـير عـن نتائج قياسك وحسابك على حد سواء .

والأصفار قد تكون أو لا تكون أرقامًا معنوية ، ويتوقف ذلك على ما إذا كانت تمثـل قيمًا معروفة أو أنها قد استخدمت لتحديد موضع العلامة العشرية . ولكـن يمكـن تلافـى الغمـوض فيما يتعلق بالأصفار باستخدام التدوين العلمى ، أى باستخدام العامل الأُسّىّ لبيان موضع العلامة العشرية وكتابة العدد الذى يحتوى على الأرقام المعنوية قبل العامل الأسى .

أمثلة :

القياس	الأرقام المعنوية	ملاحظات
3.1 cm	2	
4.36 m/s	3	
5.003 mm	4	الصفران رقمان معنويان .
0.00875 kg	3	الأصفار تحدد موضع العلامة العشرية فقط .
87×10^{-3} kg	3	نفس الكمية كما فى المثال السابق .
4500 ft	2 أو 3 أو 4	غامض . لا يمكن معرفة ما إذا كان الصفران مقاسان أو أنهما يُحددان موضع العلامة العشرية فقط
4.5×10^{3} ft	2	زال الغموض الموجود فى المثال السابق .
4.500×10^{3} ft	4	زال الغموض الموجود فى المثال السابق .

من الضرورى عند إجراء الحسابات معرفة عدد الأرقام المعنوية اللازم الاحتفاظ بها فى النتيجة . ذلك أن الآلات الحاسبة تعطى النتيجة على هيئة عدد مكون مما يقرب من عشرة أرقام حتى وإن كانت الكميات المدخلة مكونة من عددين معنويين أو ثلاثة فقط . وسوف نتعرف خلال هذا المقرر على قاعدتين بسيطتين لحل هذه المشكلة .

الأرقام المعنوية فى عمليتى الجمع أو الطرح

عند جمع أو طرح الكميات المناسبة يمكن أن تكون ضباطة النتيجة مساوية فقط لأقل الحدود ضباطة فى المجموع أو الفرق . وفى هذه الحالة تكون كل الأرقام وحتى حد الضباطة هذا أرقامًا معنوية جميعها .

الأرقام المعنوية فى عمليتى الضرب والقسمة

عند ضرب أو طرح الكميات المقاسة يمكن أن يكون عدد الأرقام المعنوية فى النتيجة مساويًا فقط لأقل عدد من الأرقام المعنوية فى أى عامل فى المسألة .

مثال توضيحى 1-1

لنفرض أنك قد أجريت ثلاثة قياسات للطول باستخدام أجهزة ذات ضباطات مختلفة وأنك حصلت على 3.76 cm ، 46.855 cm ، 0.2 cm . ما مجموع هذه القيم ؟

استدلال منطقى :

الحساب :

الآلة الحاسبة تعطى :

$$\begin{array}{r} 3.76\ \text{cm} \\ +46.855\ \text{cm} \\ +\ 0.2\ \ \ \text{cm} \\ \hline 50.815\ \text{cm} \end{array}$$

ولكن قاعدة الأرقام المعنوية فى الجمع والطرح تفيدنا أن النتيجة يجب أن تعطى لأقرب 0.1 cm فقط وذلك لأن أقل الكميات ضباطة (0.2) معرفة حتى هذه الضباطة فقط . الإجابة الصحيحة إذن هى 50.8 cm .

ولكى نرى أن هذا صحيح بالفعل ، لننظر إلى معنى ضباطة كل من الأعداد السابقة . بتطبيق قاعدة الـ $\pm\frac{1}{2}$ المذكورة فى صفحة 3 سنجد أن القيمة الأولى تقع فى المدى من 3.755 إلى 3.765 . كذلك فإن القيمة الثانية يمكن أن تكون 46.8555 وهى أكبر قيمة أو 46.8545 وهى أصغر قيمة ، أما القيمة الثالثة فتقع فى المدى من 0.15 إلى 0.25 . ولإيجاد درجة عدم اليقين فى المجموع يمكن إيجاد أكبر مجموع باستخدام القيم العليا للأعداد الثلاثة ثم حساب أصغر مجموع باستخدام القيم الصغرى لها :

أكبر مجموع :

$$\begin{array}{r} 3.765 \\ +46.8555 \\ +\ 0.25 \\ \hline 50.8705 \end{array}$$

أصغر مجموع :

$$\begin{array}{r} 3.755 \\ +46.8545 \\ +\ 0.15 \\ \hline 50.7595 \end{array}$$

ومن ذلك نجد أن مدى اليقين أكبر قليلا من 0.1 cm . هذا المثال التوضيحى يبين أنه حتى الرقم المعنوى الثالث موضع شك ، ومن ثم ليس هناك أى مبرر لادعاء أن الضباطة أعلى من 50.8 cm .

مثال توضيحى 2-1

ما حجم صندوق قيست أطوال أضلاعه فوجد أنها 31.3 cm ، 28 cm ، 51.85 cm ؟

استدلال منطقى :

تذكر أولاً أن حجم الصندوق يمكن إيجاده بضرب طوله فى عرضه فى ارتفاعه . وباستخدام الآلة الحاسبة نجد أن :

$$\text{الحجم} = (31.3\ \text{cm})(28\ \text{cm})\ (51.85\ \text{cm}) = 45{,}441.34\ \text{cm}^3$$

ولكن قاعدة الأرقام المعنوية تحتم الاحتفاظ **برقمين معنويين** فقط (لأننا محددون برقمين معنويين فى القيمة 28 cm) :

$$(\text{الحجم}) = 45{,}000\ \text{cm}^3 = 4.5 \times 10^4\ \text{cm}^3$$

يبدو أننا قسونا على أنفسنا قسوة شديدة بإهمال جميع الأرقام المعنوية الأخرى . ولكن بالنظر إلى معنى الضباطة سنرى أن أكبر قيم للأعداد الثلاثة ، باستعمال معنى الضباطة ، هى 31.35 ، 28.5 ، 51.855 . وبذلك سنجد أن القيمة **العظمى** للحجم هى :

القيمة العظمى للحجم = (31.35 cm) (28.5 cm) (51.855 cm) = 46,300 cm^3

ويمكن إيجاد **القيمة الصغرى** للحجم باستخدام القيم الصغرى للأعداد المعطاة :

القيمة الصغرى للحجم = (31.25 cm) (27.5 cm) (51.845 cm) = 44,600 cm^3

تبين القياسات إذن أن الحجم المحسوب يجب أن يكون فى هذا المدى . وهكذا نرى أن الرقم الثانى نفسه غير يقينى ، ومن ثم فإن الحجم يكون 45,000 cm^3 تقريبًا . وهو يتكون من رقمين معنويين فقط . ■

تلخيصًا لما سبق من المهم أن نتذكر الآتى :

الحسابات لا يمكنها زيادة ضباطة الكميات المقاسة أو عدد أرقامها المعنوية .

6-1 مبادئ الفيزياء كمعادلات رياضية

يلاقى الكثير من الطلاب (وقد تكون أنت واحد منهم) صعوبة صغيرة ولكنها ماكرة فى حل المعادلات الجبرية فيما يسمى بالمسائل « اللفظية » حيث يتطلب الأمر اشتقاق هذه المعادلات من نص المسألة . معنى ذلك أن عملية بناء المعادلة من المفاهيم التى تعطى لغويًا فى المسألة غالبًا ما تمثل صعوبة كبيرة للطلاب . ومع ذلك فإن بناء الصيغة الرياضية فى مسألة لفظية لها أهمية مطلقة فى تعلم وفهم الفيزياء .

ويمكن اختصار عملية بناء المعادلة من الألفاظ إلى النقاط الآتية :

1 ـ حذف الأجزاء غير المتصلة بالموضوع ذهنيًا من العبارة اللفظية أو ، بأسلوب آخر ، استخراج **الكميات الجوهرية** من الجملة .

2 ـ التعبير عن قيم الكميات غير المعطاة **برموز** بسيطة (مثل x ، y) .

3 ـ تحديد **الشكل الرياضي للمبادئ الأساسية** التى تربط بين الكميات الجوهرية حيث أن هذه المبادئ غالبًا ما لا تعطى صراحة فى نفس المسألة . بالاختصار :

تمدنا التعريفات والقوانين بالعلاقات بين الخواص الفيزيائية التى تمكننا من تحويل العبارات اللفظية إلى معادلات رياضية .

مثال توضيحى 3-1

لديك النية لإنفاق 10.00$ على الهامبورجر وشرائح لحم البقر (ستيك) . فإذا اشتريت 3.00 أرطال من الهامبورجر بسعر قدره 1.29$ لكل رطل ، فما كمية شرائح

لحم البقر الذى تستطيع شراءه إذا كان سعرها $3.99 لكل رطل ؟

استدلال منطقى :

الكميات الجوهرية هنا هى التكلفة الكلية وسعر الرطل من الهامبورجر وشرائح لحم البقر ووزن كل منهما ، المسألة هى سعر الرطل من كل من السلعتين ووزن الهامبورجر والتكلفة الكلية . أما المجهول فهو وزن شرائح لحم البقر (ولنرمز له بالحرف x) التى يمكن الحصول عليها بعد شراء الهامبورجر . المبدأ الأساسى الذى يربط بين هذه الكميات مفهوم لنا جميعًا من حياتنا اليومية وهو أن سعر الرطل مضروبًا فى الوزن يساوى ثمن كل سلعة . ونعلم أيضا أن مجموع ثمن الهامبورجر وشرائح لحم البقر يساوى $10.00 وبكتابة كل هذا فى الشكل الرياضى نحصل على المعادلة :

$$(3.00\ \text{lb})\ (\$1.29/\text{lb}) + (x\ \text{lb})(\$3.99/\text{lb}) = \$\ 10.00$$

من السهل بالطبع حل هذه المعادلة وإيجاد وزن شرائح لحم البقر x :

$$(x\ \text{lb})\ (\$3.99\ /\ \text{lb}) = \$10.00 - \$3.87$$

تحقق أن $x = 1.54$ lb يجب أن تتكون من ثلاثة أرقام معنوية .

مثال توضيحى 1-4

تسير سيارة سباق فى حلبة السباق بسرعة مقدارها 215 km/h . فإذا كان طول الدورة الواحدة من الحلبة 2.00 km ، فما الزمن الذى تستغرقه السيارة لقطع 150 دورة ؟

استدلال منطقى :

الكميات الجوهرية المعطاة هى عدد الدورات اللازم قطعها وطول الدورة الواحدة ومقدار سرعة السيارة ، والمطلوب هو إيجاد الزمن الكلى الذى سنرمز له بالرمز t . المبدأ الأساسى الذى يربط بين مقدار السرعة والزمن مألوف لنا أيضا وهو

$$\text{مقدار السرعة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن اللازم}}$$

وإذا رمزنا لمقدار السرعة بالرمز v وللمسافة المقطوعة بالرمز d يمكننا ترجمة هذه المعادلة اللفظية إلى الشكل الرياضى :

$$v = \frac{d}{t}$$

من المهم أن تنظر إلى هذه المعادلة **ليس** على أنها صيغة رياضية لمقدار السرعة v ، بل على أنها **علاقة** بين الكميات الثلاث التى يمكن التعامل معها طبقًا لقواعد علم الجبر . فمثلاً ، بضرب كلا الطرفين فى t نحصل على

$$vt = \left(\frac{d}{t}\right)t = d$$

وبقسمة كلا الطرفين فى المعادلة السابقة على v نجد أن

$$\frac{vt}{v} = t = \frac{d}{v}$$

لكن المسافة الكلية d التى قطعتها السيارة ليست معطاة صراحة بالمسألة ، ولكن العلاقة بين d والكميات المعطاة ربما كانت معروفة لك حتى بدون دراسة الفيزياء :

(عدد الدورات) (طول الدورة الواحدة) = المسافة الكلية

$$d = (l)(n)$$

حيث استعملنا الحرف l كرمز لطول الدورة الواحدة و n كرمز لعدد الدورات .

وهكذا نكون قد خلقنا معادلتين تحتويان على المعطيات والمجاهيل وذلك بتطبيق مبدأين أساسيين بسيطين ؛ والباقى إذن من حل المسألة رياضى بحت . لنحسب d أولاً :

$$d = (l)(n) = \left(\frac{2.00\ \text{km}}{\text{lap}}\right)(125\ \text{laps}) = 250\ \text{km}$$

وبعدئذ نحسب t :

$$t = \frac{d}{v} = \frac{250\ \text{km}}{215\ \text{km/h}} = 1.16\ \text{h}$$

يلاحظ فى الحل الأخير أن $\text{km/(km/h)} = \text{h}$. ■

وبالرغم من أن كثيرًا من المسائل فى هذا الكتاب أكثر صعوبة من هاتين المسألتين ، فإن العملية السابق شرحها هى أساس « شغل » الفيزياء . وكلما كان عدد مبادئ الفيزياء الأساسية التى تعلمها كبيرًا كلما زادت مقدرتك على ترجمة المسألة اللفظية إلى معادلة رياضية . ونود أن نؤكد عليك مرة أخرى ألا تعتبر المبادئ بمثابة « صيغ رياضية » لكمية ما ، فإنها فى الحقيقة علاقات بين الخواص الفيزيائية كما تعين بالمشاهدة والتجربة . والواقع أن النقطة الجوهرية فى فهم الفيزياء هى القدرة على اختيار وتطبيق المبادئ الملائمة على أية مسألة ما . وعندئذ سوف تتحول عملية الحل إلى عملية رياضية بحتة .

الرياضيات المستخدمة فى هذا المقرر

يتطلب هذا المقرر فى الفيزياء ، والذى تبدأه الآن ، أن تكون على دراية تامة بجبر المرحلة الثانوية وكذلك بعض علم حساب المثلثات البسيط . إضافة إلى ذلك يفترض أن تكون ملمًا بالصيغ الرياضية لمحيط ومساحة وحجم الأشكال الهندسية المشهورة . ذلك ويحتوى اللحق 2 على مراجعة رياضية تفصيلية للرياضيات المطلوبة هنا وكذلك بعض الأمثلة المحلولة .

وسوف تقابلك أثناء الدراسة الأنواع الآتية من المعادلات الجبرية .

1 ـ المعادلة الخطية : $ax + b = 0$

2 ـ المعادلة التربيعية : $ax^2 + bx + c = 0$

3 ـ المعادلات الآنية فى مجهولين أو ثلاثة ، مثل :

$$kx + ly + m = 0 \qquad ax + by + c = 0$$

أما العلاقات الوظيفية التى سوف تتعامل معها فهى :

1 ـ التناسب الخطى : $y = ax + b$

2 ـ التناسب التربيعى : $y = ax^2 + bx + c$

3 ـ التناسب العكسى : $y = \dfrac{k}{x}$

4 ـ التناسب التربيعى العكسى : $y = \dfrac{k}{x^2}$

5 ـ التناسب اللوغاريتمى :

الأساس 10 : $x = 10^y \qquad y = \log x$

الطبيعى (الأساس e) $x = e^y \qquad y = \ln x$

هذا ويمكن عرض كل من هذه العلاقات الوظيفية بشكل مرئى على صورة منحنى ، وهذا يساعد كثيرًا فى تحديد نوع التناسب وتفسيره بسهولة تامة . وأخيرًا فإن الدوال المثلثية والقياسات الزاوية التى سوف نستعملها هى :

1 ـ $\sin x$ ، $\cos x$ ، $\tan x$.

2 ـ الزاوية النصف قطرية والدرجة لقياس الزاوية .

3 ـ قانون الجيوب .

4 ـ قانون جيوب التمام .

وعليك الآن الرجوع إلى الملحق 3 إذا كانت بعض هذه الموضوعات غير مألوفة لك .

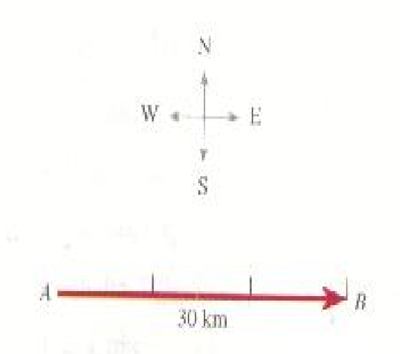
1-7 الكميات المتجهة والقياسية

عند قياسك لكمية ما فإنك تعبر عن النتيجة بدلالة عدد ما . فمثلاً قد يكون طولك 165 cm ، وهذه كمية لها قيمة عددية ، 165 (وتسمى **مقدار الكمية**) **ووحدة قياس** ، وهى السنتيمتر فى هذه الحالة . كذلك يمكنك التعبير عن طولك بالكمية 65 in أو 5.4 ft . ويلاحظ فى كل حالة أن الكمية لها مقدار ووحدة قياس . والطول ، مثل كميات أخرى كحجم صندوق أو عدد حبات الحلوى فى إناء زجاجى ، لا يرتبط بأى اتجاه . وتسمى الكميات التى لا يرتبط بها أى اتجاه **الكميات القياسية** .



تستخدم المتجهات كل يوم للإشارة إلى الاتجاهات التى نسير فيها .

وهناك كميات أخرى ترتبط بالاتجاهات . فضابط الشرطة مثلاً يهتم ليس فقط بمقدار سرعة حركة سيارتك فى شارع ذى اتجاه واحد بل باتجاهها أيضا ، وسوف يقلق قلقًا شديدًا إذا كان اتجاه الحركة غير صحيح . الحركة إذن هى كمية لها اتجاه بالإضافة إلى المقدار . ولوصف الحركة وصفًا تامًا يجب تحديد اتجاهها بالإضافة إلى مقدارها ، فنقول على سبيل المثال أن مقدار السرعة 40 km/h فى اتجاه الشرق . ومن الواضح ، مثلاً ، أن النتيجة الفيزيائية للحركة شرقًا بسرعة مقدارها 40 km/h مختلف تمامًا عن النتيجة الفيزيائية للحركة شمالاً بنفس مقدار السرعة . كذلك هناك كميات كثيرة مألوفة تتضمن الاتجاه بالإضافة إلى المقدار وذلك مثل القوى (الشد والجذب) وحركتك عند السفر من مدينة إلى أخرى . وتسمى مثل هذه الكميات ذات الاتجاه علاوة على المقدار **بالكميات المتجهة** .



شكل 2-1 :
السهم الموجه يمثل إزاحة قدرها 30 km فى اتجاه الشرق .

والطريقة المناسبة لتمثيل المتجه بيانيًا هى أن يرسم المتجه على هيئة خط مستقيم يتناسب طوله مع مقدار المتجه ويوضع سهم على إحدى نهايتيه لبيان الاتجاه . لنفرض مثلاً أن سيارة قد قطعت 30 km شرقًا . يقال عندئذ أن السيارة قد عانت إزاحة قدرها 30 km شرقًا . من الواضح أن الإزاحة كمية متجهة ؛ وذلك لأن لها مقدار ، وهو 30 km ، واتجاه أيضًا ، وهو الشرق ، وهكذا يمكننا تمثيل هذه الإزاحة بسهم موجه كما بالشكل 2-1 . هذا السهم طوله ثلاث وحدات تمثل مقدار الإزاحة وهو 30 km وموجّه إلى الشرق ليوضح اتجاه الإزاحة .

1-8 جمع المتجهات

يعلم كل منا أنه عند إضافة تفاحتين إلى ثلاث تفاحات تكون الكمية الكلية خمس تفاحات . هذا مثال على كيفية جمع الكميات القياسية مجموع كميتين قياسيتين إذن هو

ببساطة مجموع مقداريهما ؛ هذا بفرض أن الكميتين لهما نفس الوحدات طبعًا . وبإضافة $40\ cm^3$ من الماء إلى $20\ cm^3$ من الماء ستحصل على $60\ cm^3$ ؛ أى أن الكميات القياسية هنا أيضًا تجمع جمعًا عدديًا .

لكن الكميات المتجهة لا تجمع بهذه الطريقة ، وسوف نوضح هذه النقطة أولاً باستخدام الإزاحات .

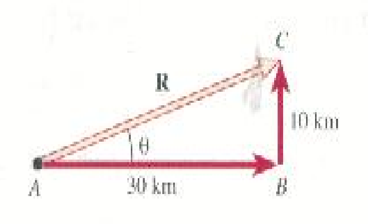
الإزاحة من نقطة ما A إلى أخرى B هى كمية متجهة مقدارها طول الخط المستقيم من A إلى B واتجاهًا هو اتجاه سهم يشير من A إلى B .

لنعتبر ما يحدث عندما تقوم بإزاحة قدرها 30 km تجاه الشرق ثم إزاحة أخرى قدرها 10 km تجاه الشمال كما هو موضح بالشكل 3–1 . والمطلوب هو إيجاد الإزاحة الكلية الناتجة عن هاتين الإزاحتين ، أى الإزاحة من A إلى C . هذه الإزاحة ، والممثلة بالسهم **R** ، تسمى **الإزاحة المحصلة** وتمثل مجموع متجهى الإزاحة .

من الواضح أن الإزاحة المحصلة من A إلى C هى متجه وأن اتجاهها يختلف عن اتجاه أى من الإزاحتين الأصليتين ، كما أن مقدارها ليس 30 km + 10 km = 40 km بالتأكيد . وبدلاً من ذلك يمكننا أن نجد باستخدام نظرية فيثاغورث أن مقدار الإزاحة المحصلة هو :

$$\text{R مقدار} = \sqrt{(10\ \text{km})^2 + (30\ \text{km})^2} = \sqrt{(1000\ \text{km})^2} = 32\ \text{km}$$

هذا المثال يبين لنا أن جمع التجهات يختلف اختلافًا تامًا عن جمع الكميات القياسية .



شكل 3–1 : رسم اتجاهى يمثل رحلة قطع فيها مسافر 30 km فى اتجاه الشرق ثم 10 km اتجاه الشمال .

كثيرًا ما يكون لاتجاه التجه المحصل نفس أهمية مقداره . وإحدى الطرق لإيجاد الاتجاه هى قياس الزاوية θ فى الشكل 3–1 بالمنقلة . وإذا كان الرسم دقيقًا طبقًا لمقياس الرسم المختار سنجد أن $\theta = 18°$ ؛ وهكذا يمكننا القول أن الإزاحة المحصلة 32 km فى اتجاه شمال الشرق بزاوية 18° .

وقبل الاستطراد فى المناقشة يجب أن نتفق على طريقة للرمز للكميات المتجهة . لنفرض أن لدينا إزاحة مقدارها 40 m واتجاهًا إلى الشمال ، وأننا اخترنا الرمز D لتمثيل هذه الإزاحة ، فإذا كنا نتعامل مع المقدار فقط سوف نرمز للإزاحة عندئذ بالحرف D العادى ، أى أننا نكتب $D = 40$ m فى هذه الحالة . أما إذا أخذنا اتجاه الإزاحة فى الاعتبار بالإضافة إلى مقدارها فإننا نوضح هذه الحقيقة بأن نرمز للإزاحة بالحرف الثقيل : **D** (ملحوظة : عند كتابة الرمز باليد فى هذه الحالة يكتب على الصور $\vec{D}$ أو $\underset{\sim}{D}$) . عليك إذن أن تتوخى الحذر فى استعمال رموز المتجهات ، فإذا كان الرمز مكتوبًا بالحرف الثخين فإن هذا يعنى أنه يمثل كمية متجهة وأن عليك الاهتمام بالاتجاه علاوة على المقدار .

1-9 الجمع البياني للمتجهات

يمكننا دائمًا إيجاد الإزاحة المحصلة لعدة إزاحات متتالية بالتمثيل البياني لها باستخدام مقياس رسم مناسب ، وهذا مبين بالشكل 3-1 في حالة إزاحتين من هذا النوع . لاحظ أن هذه الطريقة تتكون من رسم المتجهين بنفس مقياس الرسم وبالزوايا المحددة ، مع مراعاة انطباق ذيل المتجه الثاني على رأس المتجه الأول . عندئذ تكون المحصلة هي ذلك المتجه الذي يشير من ذيل المتجه الأول إلى رأس المتجه الثاني .

هذه الطريقة لإيجاد المحصلة تسمى **الطريقة البيانية** ، ويمكن تعميمها بسهولة لإيجاد محصلة أكثر من متجهين . فمثلاً ، لنفرض أننا نريد جمع الإزاحات المتتالية الآتية : 10 km شرقًا ، 16 km جنوبًا ، 14 km شرقًا ، 6 km شمالاً وأخيرًا 4 km غربًا . لإيجاد المحصلة ترسم المتجهات الممثلة للإزاحات المتتالية بالطريقة السابق وصفها لنحصل على رسم بياني المتجهات المبين بالشكل 4-1 . وبناء على ما تقدم نجد أن الإزاحة المحصلة **R** تمتد من ذيل المتجه الأول إلى رأس الأخير ، وعليك أن تتأكد أنك تفهم هذا الرسم . وباستخدام المسطرة والمنقلة وأخذ مقياس الرسم المستخدم في الاعتبار ستجد أن مقدار الإزاحة المحصلة **R** هو 22 km وأن اتجاهها هو $\theta = 26°$ جنوب الشرق .

شكل 4-1 :

الجمع البياني لخمس إزاحات متتالية

هذه النتيجة لا تعتمد على الترتيب الذي تجمع به المتجهات . حاول مثلا أن تغير ترتيب الإزاحات في الشكل 4-1 ليصبح 16 km جنوبًا ثم 4 km غربًا ثم 10 km شرقًا ثم 6 km شمالاً وأخيرًا 14 km شرقًا وتحقق أن الإزاحة المحصلة التي تحصل عليها في هذه الحالة هي نفس ما حصلت عليه سابقًا .

نتيجة جمع المتجهات لا تعتمد على الترتيب الذي يجرى به الجمع .

يبين الشكل 5-1 كيفية استخدام الطريقة البيانية لجمع إزاحتين غير متعامدتين إحداهما على الأخرى الأولى 10 km في اتجاه 45° شرق الشمال والثانية 5 km في الاتجاه الجنوبي . وكما سبق وصفه ، ترسم المتجهات بمقياس رسم مناسب وبالزوايا الصحيحة وعندئذ ستكون المحصلة هي المتجه الذي يشير من ذيل المتجه الأول إلى رأس الثاني .

شكل 5-1 :

رسم بياني المتجهات لرحلة طولها 10 km في الاتجاه الشمالي الشرقي تليها رحلة أخرى طولها 5 km في الاتجاه الجنوبي .

مثال توضيحي 5-1

اجمع الإزاحات الآتية بيانيًا :

الإزاحة (cm)	25	10	30
الزاوية (بالدرجات)	30	90	120

تقاس الزوايا بالنسبة لاتجاه الشرق كما هو مبين بالشكل 6-1 حيث أن الزوايا تقاس عادة بهذه الطريقة .

استدلال منطقي :

يرسم رسم بيانى المتجهات كما بالشكل 7-1 (ستكون فكرة جيدة أن تقوم بالرسم بنفسك مستخدمًا البيانات المعطاة ثم تقوم بمقارنة رسمك بالشكل 7-1) . سوف تبين القياسات عندئذ أن $R = 49\ cm$ ، $\theta = 82°$.

N (y)

θ

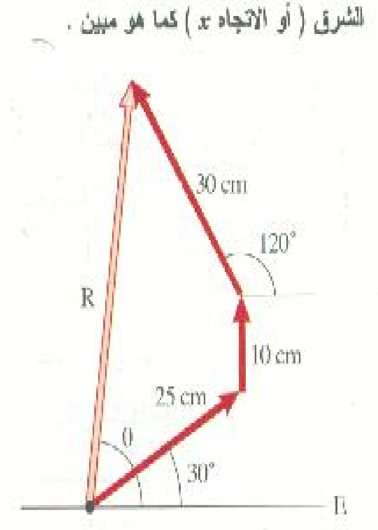
E (x)

شكل 6-1 :
من المعتاد قياس الزوايا بالنسبة لاتجاه الشرق (أو الاتجاه x) كما هو مبين .

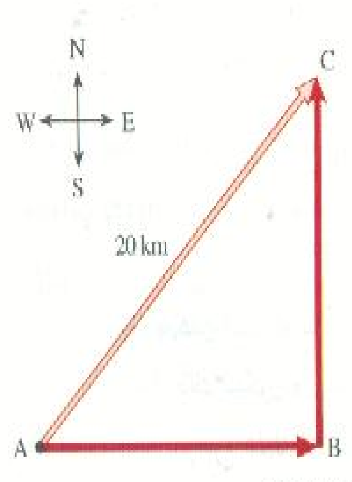
1-10 المركبات المتعامدة للمتجهات

بالرغم من أن الطريقة البيانية لجمع المتجهات بسيطة ومباشرة فإنها مرهقة وتعتمد دقتها على دقة الرسم فقط ، ولذلك فإننا نحتاج إلى طريقة أخرى خالية من هذه العيوب . هذه الطريقة تسمى **طريقة المركبات المتعامدة** لجمع المتجهات . وقبل البدء فى وصف هذه الطريقة علينا أن نتعلم أولاً كيفية إيجاد المركبات المتعامدة .

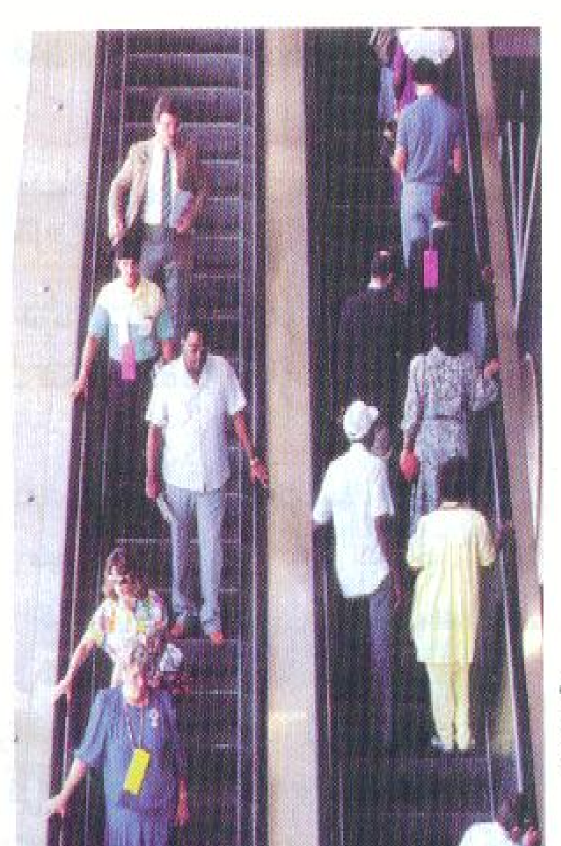
لنفرض أن شخصًا ينتقل من النقطة A إلى نقطة C تقع على بعد 20 km شمال شرق A . السهم الموجه الذى يمثل هذه الإزاحة هو السهم الممتد من A إلى C فى الشكل 8-1 . من الممكن أيضًا الانتقال من A إلى C باتباع المسار ABC ، بمعنى أن نقوم أولاً بإزاحة من A إلى B ثم بإزاحة أخرى من B إلى C . النتيجة النهائية واحدة فى الحالتين وهى أنك تنتقل من A إلى C . ومن ثم يمكن استبدال الإزاحة من A إلى C بالمتجهين **AB** و **BC** المتعامدين أحدهما على الآخر . هذان المتجهان يسميان **المركبتين المتعامدتين** للمتجه الأصلى . وسوف نرى فى القسم التالى أن المتجهات يمكن جمعها بسهولة باستخدام مركباتها المتعامدة . ولكننا يجب أن نتعلم أولاً كيف نستخدم علم حساب المثلثات لإيجاد هذه المركبات المتعامدة .



شكل 7-1 :
جمع الإزاحات المعطاة فى المثال التوضيحى 5-1.

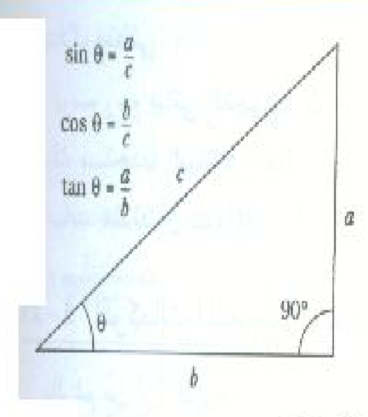


شكل 8-1 :
تحليل الإزاحة 20 km فى اتجاه شمال الشرق إلى مركبتى الإزاحة AB شرقًا و BC شمالاً . AB و BC هما المركبتان المتعامدتان للمتجه AC .

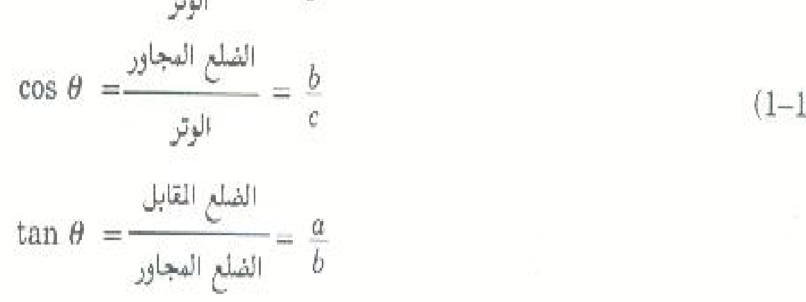


الصاعدون والهابطون على السلم الكهربائى المتحرك يتحركون بنفس معدل الحركة ولكن بسرعتين مختلفتين .

سنقوم الآن بمراجعة موجزة للدوال المثلثية البسيطة للمثلث قائم الزاوية ، وإذا لم تكن قرأت الغلاف الداخلي الخلفي بعد فعليك أن تفعل ذلك الآن . وبدلالة أضلاع المثلث قائم الزاوية الموضح بالشكل 9–1 ، يمكن تعريف هذه النسب المثلثية كما يلي :



شكل 9–1 :
الدوال المثلثية للمثلث قائم الزاوية .



$$\sin\theta = \frac{\text{الضلع المقابل}}{\text{الوتر}} = \frac{a}{c}$$

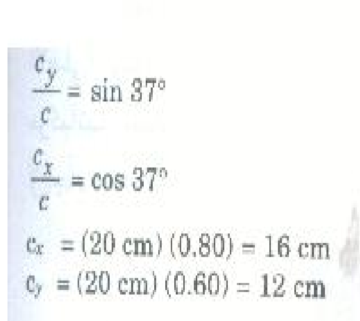
$$\cos\theta = \frac{\text{الضلع المجاور}}{\text{الوتر}} = \frac{b}{c} \qquad (1-1)$$

$$\tan\theta = \frac{\text{الضلع المقابل}}{\text{الضلع المجاور}} = \frac{a}{b}$$

هذا وتعطى معظم الآلات الحاسبة هذه الدوال لمختلف الزوايا . لاحظ أن الدوال المثلثية نسب لا بعدية . وهكذا يتضح من المعادلات (1–1) أنه يمكن إيجاد ضلعى المثلث بمعلومية الوتر c وإحدى الزاويتين :

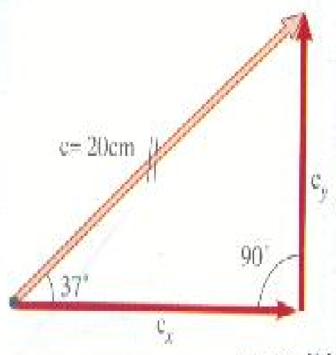
$$a = c\sin\theta \qquad b = c\cos\theta$$

لنحاول الآن تطبيق هذه المعلومة لإيجاد مركبتى متجه .



يمثل الشكل 10–1 متجه إزاحة مقداره 20 cm ويصنع زاوية قدرها 37° مع المحور x . (سنستخدم الآن الاتجاهين x و y بدلاً من الشرق والشمال ، وإذا أردت يمكنك اعتبار أن x يمثل اتجاه الشرق و y اتجاه الشمال) . وطبقاً لما سبق يمكن القول أن المتجه الأصلى **c** يكافئ المجموع الاتجاهى للمركبتين c_x و c_y اللتين يمكن إيجاد مقداريهما باستخدام علاقتى الجيب وجيب التمام :

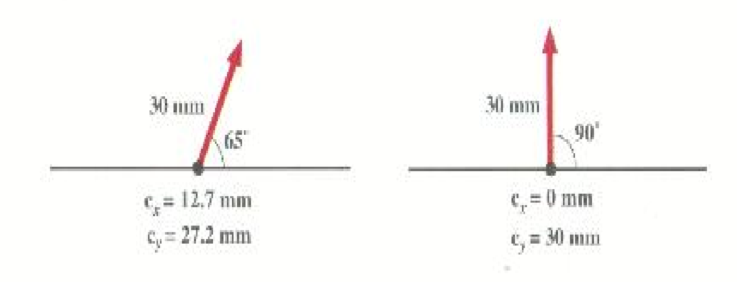
$$c_x = c\cos 37° = (20\ \text{cm})(0.80) = 16\ \text{cm}$$
$$c_y = c\sin 37° = (20\ \text{cm})(0.60) = 12\ \text{cm}$$

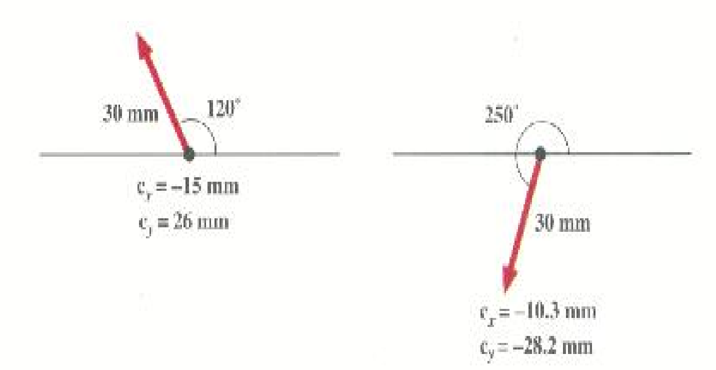


شكل 10–1 :
الشرطتان الموضوعتان على المتجه c تبينان أنه قد استبدل بمركبتيه . لاحظ أن $\sin 37° = 0.60$ و $\cos 37° = 0.80$.

أى أن الإزاحة 20 cm التى تصنع زاوية قدرها 37° مع المحور x تكافئ مجموع المركبتين المتعامدتين $c_x = 16$ cm فى الاتجاه الموجب للمحور x و $c_y = 12$ cm فى الاتجاه السالب للمحور y .

هذه الطريقة يمكن استخدامها لاستبدال أى متجه بمركباته المتعامدة ، فإذا ما تعلمت كيف تفعل ذلك سيكون من السهل عليك جمع (أو طرح) أى نوع من المتجهات ولكن قبل متابعة الموضوع عليك أن تتأكد أنك تستطيع إيجاد المركبتين x ، y للمتجهات المبينة بالشكل 11–1 . لاحظ أن اتجاه كل مركبة يبين بإشارة جبرية مناسبة . فعندما تكتب $c_x = -15$ mm فهذا يعنى أن المركبة فى الاتجاه السالب للمحور x . وبالمثل فإن $c_y = 30$ mm تعنى أن المركبة تشير فى الاتجاه الموجب للمحور y . أى أن اتجاه مركبة المتجه يعطى كإشارة جبرية ملحقة بقيمتها العددية .





شكل 1-11 :

تحقق أن مركبتى كل من هذه المتجهات كما هو موجود بالفعل .

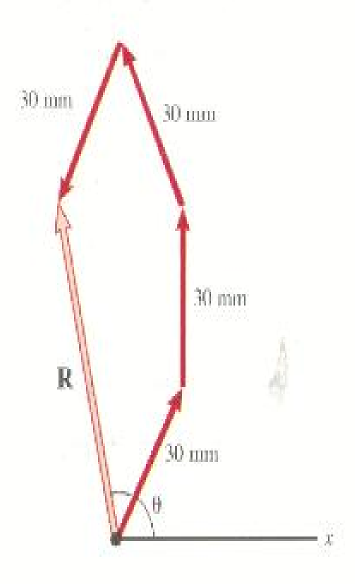
1-11 الجمع المثلثى للمتجهات

الآن وقد تعلمت طريقة إيجاد المركبات المتعامدة سيكون من السهل عليك جمع الإزاحات . لنفرض مثلاً أن حشرة على سطح منضدة وتقوم بالإزاحات المبينة بالشكل 1-11 .

30.0 mm	بزاوية 65.0° بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x (الشرق) .
30.0 mm	بزاوية 90.0°
30.0 mm	بزاوية 120.0°
30.0 mm	بزاوية 250.0°

حيث تقاس الزوايا كما هو موضح بالشكل 6-1 .

من الممكن بالطبع إيجاد الإزاحة المحصلة بيانيا باستخدام رسم بيانى المتجهات المبين بالشكل 12-1 ؛ ولكن هذه الطريقة تصبح مرهقة تمامًا فى هذه الحالة . الطريقة الأسهل هى أن نستخدم مركبتى كل من هذه المتجهات لإيجاد مركبتى المحصلة . وللحصول على المركبة x ، ولتكن R_x ، علينا ببساطة أن نجمع المركبات x للمتجهات الأصلية والسابق إيجادها فى الشكل 1-11 :



شكل 1-12 :

محصلة الإزاحة المبينة بالشكل 11-1 . وباستخدام منقلة ومسطرة ونفس مقياس الرسم المستخدم فى الشكل 11-1 ستجد أن R تمثل إزاحة قدرها 56.4 mm تميل بزاوية 103° مع اتجاه x الموجب .

$$\begin{aligned} R_x &= 12.7 + 0 + (-15.0) + (-10.3)\ \text{mm} \\ &= 12.7 + 0 - 15.0 - 10.3 = -12.6\ \text{mm} \end{aligned}$$

وبالمثل يمكن إيجاد المركبة y للمحصلة R_y بجمع المركبات y للمتجهات الأصلية :

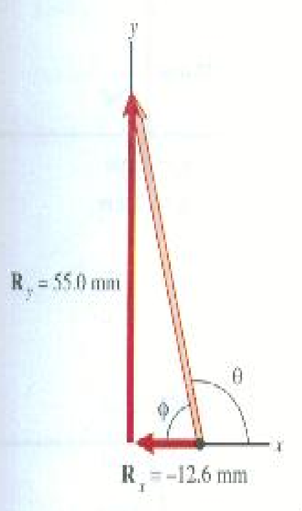
$$R_y = 27.2 + 30.0 + 26.0 - 28.2 = 55.0\ \text{mm}$$

هاتان هما المركبتان المتعامدتان للمحصلة . لاحظ أن R_x سالبة ولذلك فهى فى الاتجاه السالب للمحور x . من الضرورى إذن أن تؤخذ إشارات المركبات فى الاعتبار عند تعيين

المجموع . لاحظ أيضًا أنك تستطيع جمع المركبات بأى ترتيب تراه ، كما فى الجمع البيانى ، لأن هذا لن يغير النتيجة .

يمثل الشكل 13–1 المحصلة **R** ومركبتيها المتعامدتين . ذلك أن المحصلة هى وتر مثلث قائم الزاوية ضلعاه الآخران هما $\mathbf{R}_x = -12.6$ mm و $\mathbf{R}_y = 55.0$ mm . وباستخدام نظرية فيثاغورث سنجد أن مقدار **R** هو

$$R = \sqrt{(55.0\,\text{mm})^2 + (12.6\,\text{mm})^2} = \sqrt{3184\,\text{mm}^2} = 56.4\,\text{mm}$$



شكل 13–1 :
احسب مقدار واتجاه **R** بمعلومية مركبتيها .

ولإيجاد الزاوية θ التى تصنعها المحصلة مع المحور x علينا أولاً إيجاد الزاوية ϕ فى الشكل 13–1 . لاحظ أن

$$\tan\phi = \frac{\text{الضلع المقابل}}{\text{الضلع المجاور}} = \frac{R_y}{R_x} = \frac{55.0}{12.6} = 4.37$$

علينا الآن إيجاد الزاوية ϕ التى ظلها 4.37 . هذه الزاوية تسمى **معكوس** الظل وتكتب على الصور inv tan أو $\tan^{-1}$. وباستعمال الجداول المثلثية أو الآلة الحاسبة اليدوية ستجد أن

$$\phi = \tan^{-1}(4.37) = 77.0^\circ$$

وحيث أن $\theta + \phi = 180^\circ$ ، إذن

$$\theta = 180^\circ - \phi = 103^\circ$$

هذا ويمكنك التأكد من صحة هذه النتائج بحسابها من الشكلين 12–1 و 13–1 مستخدمًا المسطرة والمنقلة . كذلك فإننا نرى من المعقول عند تطبيقك للطريقة المثلثية أن تستعين بالرسم التخطيطى لترى ما إذا كانت نتائجك واقعية .

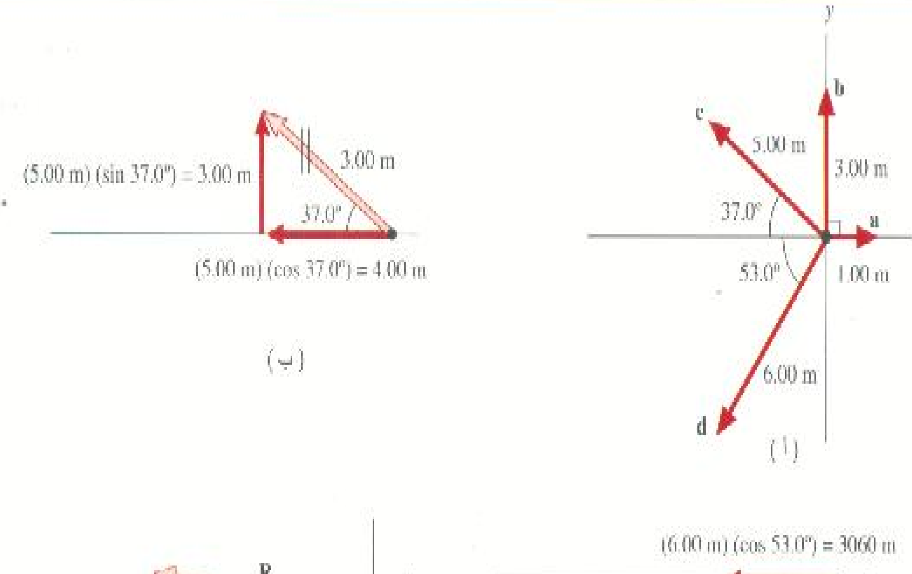
مثال توضيحي 6–1

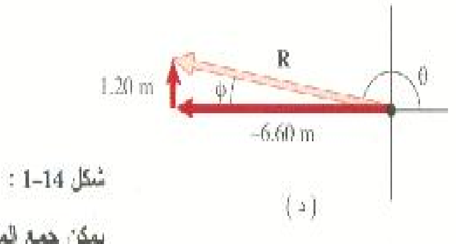
اجمع الإزاحات المبينة بالجزء أ من الشكل 14–1 .

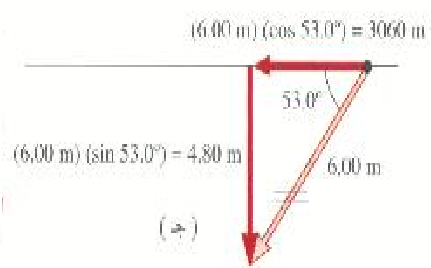
استدلال منطقى :

رمزنا للمتجهات بالرموز $\boldsymbol{a}$ ، $\boldsymbol{b}$ ، $\boldsymbol{c}$ ، $\boldsymbol{d}$. المركبتان x و y لكل من $\boldsymbol{a}$ و $\boldsymbol{b}$ واضحة . أما مركبتى كل من المتجهين الآخريين فقد أوجدناهما فى الجزئين ب ، جـ من الشكل . لنضع الآن البيانات التى حصلنا عليها كما بالشكل 14–1 فى صورة جدول حتى يمكننا إيجاد $\mathbf{R}_x$ و $\mathbf{R}_y$.

	a	b	c	d
$\mathbf{R}_x$	+1.00	0	−4.00	−3.60
$\mathbf{R}_y$	0	+3.00	+3.00	−4.80







شكل 14-1 :

يمكن جمع المتجهات المبينة في الجزء (أ) بطريقة المركبات لتحصل على المحصلة المبينة في (د) .

ومن ثم نجد أن

$$R_x = 1.00 + 0 - 4.00 - 3.60 = 1.00 - 7.60 = -6.60 \text{ m}$$
$$R_y = 0 + 3.00 + 3.00 - 4.80 = +1.20 \text{ m}$$

والآن نستخدم هاتين المركبتين لرسم **R** كما بالشكل 14-1 د . ومن الرسم نجد أن

$$R = \sqrt{(6.60 \text{ m})^2 + (1.20 \text{ m})^2} = 6.71 \text{ m}$$

كذلك من الشكل 14-1 د .

$$\tan \phi = \frac{1.20}{6.60} = 0.182$$

ومنه نحصل على $\phi = 10°$. وعليه فمن الشكل 14-1 د .

$$\theta = 180° - 10° = 170°$$

تمرين : ما المجموع الاتجاهي للمتجه 5.00 m بالشكل 14-1 ب والمتجه 6.00 m بالشكل 14-1 جـ ؟ . الإجابة : 7.81 m بزاوية 193° .

1-12 طرح المتجهات

هناك كثير من المواقف الفيزيائية التي يمكن تحليلها ببساطة باستخدام الطرح الاتجاهي . فمثلاً ، إذا سرت 10 بلوكات شرقًا (والبلوك صف من البيوت أو المحال التجارية المتلاصقة) ، ثم غيرت مسارك 4 بلوكات غربًا فإنك تطرح إزاحة قدرها 4

بلوكات من إزاحة قدرها 10 بلوكات . يمكنك أن تقول أيضًا أنك تجمع إزاحة قدرها 10 بلوكات فى اتجاه الشرق وإزاحة قدرها 4 بلوكات فى اتجاه الغرب . الإزاحة المحصلة هى 6 بلوكات فى اتجاه الشرق فى كلتا الحالتين (شكل 15-1) .

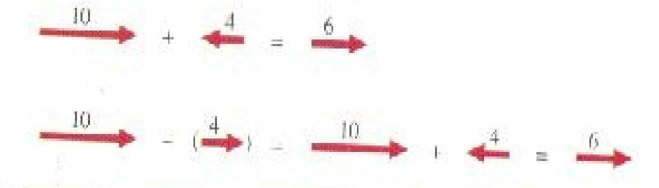
وبوضع هذا التكافؤ بين الوضعين فى ذهنك سترى أن طرح متجه ما يكافئ جمع نفس المتجه مع عكس اتجاهه ، ويخضع الطرح الاتجاهى للقاعدتين الآتيتين :

لطرح المتجه B من المتجه A اعكس اتجاه B ثم اجمعه على A .

ويعبر عن هذا رياضيًا كما يلى :

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B})$$

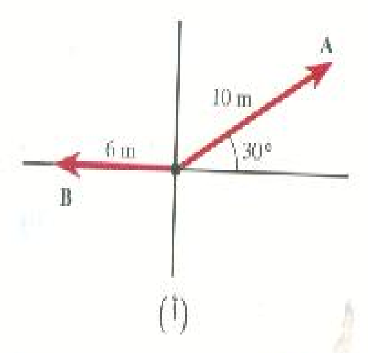
حيث B- هو مجرد المتجه B مع عكس إشارته :

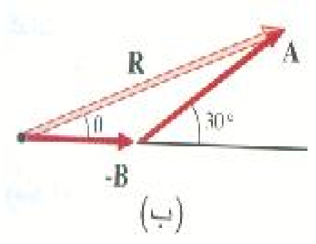


شكل 15-1 :
طريقتان متكافئتان لوصف رحلة مكونة من إزاحة قدرها 10 بلوكات اتجاه الشرق وإزاحة قدرها 4 بلوكات فى اتجاه الغرب .

مثال توضيحى 7-1

اطرح المتجه B من المتجه A فى الشكل 16-1 أ .





شكل 16-1 :
لإيجاد A - B اعكس اتجاه B ثم اجمعه على A .

استدلال منطقى : عليك إثبات أن مركبتى كل متجه كما يلى :

$$A_x = 8.70\,\text{m} \qquad A_y = 5.00\,\text{m}$$
$$B_x = -6.00\,\text{m} \qquad B_y = 0\,\text{m}$$

والمطلوب هو إيجاد R ، حيث $\mathbf{R} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B}) = \mathbf{A} - \mathbf{B}$.

$$R_x = A_x - B_x = 8.70\,\text{m} - (-6.00\,\text{m}) = 14.70\,\text{m}$$
$$R_y = A_y - B_y = 5.00\,\text{m} - 0\,\text{m} = 5.00\,\text{m}$$

ومنه

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(14.70\,\text{m})^2 + (5.00\,\text{m})^2} = 15.5\,\text{m}$$

وتعطى الزاوية التى تصنعها R مع المحور $+x$ بالعلاقة

$$\tan\theta = \frac{5.00}{14.70} = 0.340 \qquad \theta = \tan^{-1}(0.340)$$

ومنه نجد أن $\theta = 18.8°$. وقد تحققنا من الإجابة بيانيًا باستخدام الرسم المبين بالشكل 16-1ب . لاحظ أننا عكسنا اتجاه B ثم جمعناه على A . ▪

أهداف التعلم

والآن وقد انتهيت من هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) حد الضباطة ، (ب) الأخطاء الرتيبية ، (جـ) الدقة ، (د) الأخطاء الإحصائية ، (هـ) البعد ، (و) وحدة القياس ، (ز) معامل التحويل ، (ح) الرقم المعنوى ، (ط) الكمية القياسية ، (ى) الكمية المتجهة ، (ك) المركبة المتعامدة ، (ل) المتجه المحصل .

2 ـ تحديد العدد الصحيح من الأرقام المعنية فى (أ) كمية مقاسة ، (ب) نتيجة جمع أو طرح الكميات المقاسة ، (جـ) حاصل ضرب أو قسمة الكميات المقاسة .

3 ـ إعطاء الوحدة المشتقة الصحيحة الناتجة من عملية حساب رياضى تتضمن أعداد مقاسة ذات وحدات .

4 ـ إيجاد محصلة عدد من متجهات الإزاحة بالطريقة البيانية .

5 ـ إيجاد المركبتين x و y عند معرفة الإزاحة وزاويتها (أى اتجاهها) .

6 ـ إيجاد مقدار وزاوية متجه بمعلومية مركبتيه x و y .

7 ـ استخدام الطريقة المثلثية لجمع عدة متجهات .

8 ـ طرح متجه من آخر .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

مصادر أخطاء القياس :

الأخطاء الرتيبية : أخطاء ناشئة عن التصميم والمعايرة غير الصحيحين لجهاز القياس أو القراءة والتفسير غير الصحيحين للجهاز .

الأخطاء الإحصائية : فروق فى القياسات المختلفة لكمية معينة أكبر من ضباطة جهاز القياس . وتنشأ هذه الفروق بسبب تغيرات فى الكمية المقاسة ذاتها .

حد الضباطة والدقة :

حد الضباطة لجهاز القياس هو نصف أصغر قسم من أقسام القياس يستطيع الجهاز إعطاءه .

دقة القياس هى المدى الذى تختلف فيه قيمة القياس عن القيمة الحقيقية بسبب الأخطاء الرتيبية .

البعد ووحدة القياس :

البعد : واحد من سبعة خواص فيزيائية أساسية قابلة للقياس وهى : الطول والكتلة والزمن ودرجة الحرارة والتيار الكهربى وعدد الجزيئات والشدة الضيائية . كل الخواص الفيزيائية الأخرى يمكن اشتقاقها كتركيبات من الأبعاد الأساسية .

وحدة القياس : الوحدة الأساسية للقياس هى مقدار أى كمية فيزيائية معرفة بمعيار قياس كل بعد أساسى . تعرف الوحدة المشتقة بأنها التركيبة الرياضية للوحدات الأساسية المتضمنة فى تعريف الخاصية الفيزيائية المشتقة . نظاما الوحدات المستخدمان حاليًا هما نظاما الوحدات SI والنظام البريطانى .

الأرقام المعنوية :

الأرقام المعنوية فى كمية مقاسة أو محسوبة هى الأرقام المعروفة يقينًا .

قواعد الحساب بالأرقام المعنوية :

1 ـ عند جمع أو طرح كميات مقاسة تكون ضباطة النتيجة فى أحسن الأحوال مساوية لضباطة أقل الحدود ضباطة فى المجموع أو الفرق . وهنا تكون الأرقام كلها وحتى هذا الحد من الضباطة أرقامًا معنوية .

2 ـ عند ضرب أو قسمة كميات مقاسة يكون عدد الأرقام المعنوية فى النتيجة عمومًا مساويًا لأقل عدد من الأرقام المعنوية فى أى عامل مستخدم فى العملية الحسابية .

خلاصة :

1 ـ الأصفار يمكن أن تكون غامضة من حيث كونها أرقامًا معنوية أو غير معنوية ، ذلك أنها تستعمل فى كثير من الأحيان لتوضيح موضع العلامة العشرية . ولكن استعمال التدوين العلمى يزيل هذا الغموض .

2 ـ الآلة الحاسبة لا يمكنها زيادة الضباطة أو عدد الأرقام المعنوية فى كمية مقاسة .

تأكد من مراعاة القاعدتين السابقتين وتقريب نتيجة الآلة الحاسبة إلى العدد الصحيح من الأرقام المعنوية .

الكميات القياسية والمتجهات :

الكمية القياسية هى كمية ذات مقدار فقط . المتجه كمية لها مقدار واتجاه .

جمع وطرح المتجهات

الطريقة البيانية :

1 ـ اختر مقياس رسم مناسب لتمثيل مقدار كل متجه .

2 ـ اختر محور إسناد لقياسات اتجاهات المتجهات بالنسبة إليه .

3 ـ ابدأ بأحد المتجهات وارسمه بمقياس الرسم المختار فى الاتجاه الصحيح . ارسم متجها آخر بنفس مقياس الرسم فى اتجاهه الصحيح بحيث يبدأ ذيله من رأس المتجه الأول . كرر هذه العملية مع باقى المتجهات واحدًا بعد الآخر .

4 ـ لإيجاد المجموع ، أو المتجه المحصل ، ارسم خطا مستقيمًا من ذيل المتجه الأول إلى رأس المتجه الأخير . طول هذا المستقيم ، مع اعتبار مقياس الرسم ، هو مقدار المحصلة ، أما اتجاه المحصلة فيمكن قياسه بالنسبة لمحور الإسناد .

الطريقة المثلثية :

1 ـ اختر نظام إسناد مناسب يتكون من محورى إحداث متعامدين .

2 ـ حلل كل متجه إلى مركبتيه المتعامدتين باستخدام الجيب وجيب التمام .

3 ـ اجمع كل المركبات x معًا (مع أخذ الإشارة فى الاعتبار) وكل المركبات y معًا . هذان المجموعان هما المركبتان x و y ، على الترتيب ، للمحصلة .

4 ـ استخدم نظرية فيثاغورث لإيجاد مقدار المحصلة .

5 ـ أوجد اتجاه المحصلة من العلاقة .

$$\theta = \tan^{-1}\frac{R_y}{R_x}$$

خلاصة :

1 ـ يمكن إجراء عملية جمع المتجهات بأى ترتيب .

2 ـ لطرح متجه من آخر عليك فقط أن تعكس اتجاه المتجه المطلوب طرحه ثم اتباع قواعد الجمع .

3 ـ إن مراعاة إشارتى R_x و R_y فى الطريقة المثلثية للجمع تساعدك على رسم مثلث المحصلة وتحديد الزاوية اللازم حسابها فى الخطوة رقم 5 السابقة .

أسئلة وتخمينات

1 ـ ما هي الإزاحة المحصلة التي اجتازها جسمك منذ صباح اليوم حتى تستلقي في فراشك مساء ؟

2 ـ مطاران للطائرات المروحية يبعد أحدها عن الآخر بضعة كيلو مترات استقلت امرأة طائرة مروحية من أحد المطارين وهبطت بعد فترة في المطار الآخر . وفي نفس الوقت انطلق زوجها ماشيًا من أحد المطارين إلى الآخر . قارن بين الإزاحتين المحصلتين للمرأة وزوجها .

3 ـ مجموع متجهين يساوي صفرًا . ماذا يمكنك أن تستنتج عن مركباتها المتعامدة ؟

4 ـ جمعت الإزاحتان **A** و **B** . ما هي العلاقة بين **A** و **B** إذا كان مقدار مجموعهما (أ) **A + B** ؛ (ب) صفرًا ؟

5 ـ أعط تقديرًا للإزاحة المحصلة الكلية التي قمت بها خلال (أ) آخر 1.5 h ، (ب) آخر 24 h .

6 ـ ما هي بعض المواقف الفيزيائية التي تطرح فيها المتجهات ؟ هل يمكن النظر إلى هذه الكميات على أنها مجموعة بدلاً من مطروحة ؟

7 ـ مثل كل شخص في مدينة تعدادها 200000 نسمة بمتجه يمتد من أصبع قدمه إلى أنفه . قدّر محصلة هذه المتجهات (أ) عند الظهيرة ، (ب) في منتصف الليل .

8 ـ يقع المتجه **A** في المستوى xy . في أي مدى يمكن أن تقع الزاوية θ إذا كانت (أ) المركبة x للمتجه سالبة ؟ (ب) المركبتان x و y لمتجه متعاكستي الإشارة ؟

مسائل

تنقسم المسائل المعطاة في نهاية كل فصل إلى ثلاث مستويات من الصعوبة : (نمطية عادية وصعبة إلى حد ما (مميزة بمربع واحد ▪) وغاية الصعوبة (مميزة بمربعين) . المسائل المميزة بالحرف (ب) تحل بيانيًا . جميع المسائل الأخرى يجب حلها رياضيًا . تقاس الزوايا دائمًا بالنسبة للاتجاه الموجب لمحور x ما لم ينص على غير ذلك .

القسم 4-1

1 ـ إجر التحويلات الآتية للوحدات باستخدام معاملات التحويل الموجودة داخل الغلاف الأمامي لهذا الكتاب : (أ) 60 mi/h إلى m/s ، (ب) 1 yr إلى s ، (جـ) 440 yd إلى m ، (د) 1500 m إلى ft . (هـ) 40 km/h إلى m/min .

2 ـ إجر التحويلات الآتية للوحدات باستخدام معاملات التحويل الموجودة داخل الغلاف الأمامي لهذا الكتاب : (أ) 80 km/h إلى ft/s ؛ (ب) 220 days إلى s ؛ (جـ) 2600 m إلى ft ، (د) 8 mils إلى km/h . (هـ) 1300 km إلى in .

القسم 5-1

3 ـ اكتب الأطوال الآتية بالأمتار محتفظًا برقم واحد على يسار العلامة العشرية وذلك باستخدام التدوين العلمي (أ) 62.8 km ، (ب) 0.00226 mm ، (جـ) 33.3 نانومترا (nm) ، (د) 135.8 ميكرومترا (μm) ؛ (هـ) 3.002×10^3 cm .

4 ـ اكتب الكتل الآتية بالجرامات (g) محتفظًا برقم واحد على يسار العلامة العشرية ومستخدمًا التدوين العلمي : (أ) 745 kg ، (ب) 0.0669 μg ، (جـ) 32.55 ng ؛ (د) 231 بيكوجراما (pg) ؛ (هـ) 74,800 mg ؛ (و) 0.41 جيجا جرام (Gg) .

5 ـ إجر العملية الحسابية الآتية واكتب الإجابة بالتدوين المستخدم في المسألتين 1 ، 2 :

$(732 \times 10^{-3}) \times (9.82 \times 10^{5}) \div (0.545 \times 10^{7})$.

6 ـ إجر العملية الحسابية الآتية واكتب الإجابة بالتدوين المستخدم في المسألتين 1 ، 2 :
$(7.88 \times 10^5) \times (20.01) \div (341 \times 10^{-20})$.

7 ـ اذكر عدد الأرقام المعنوية في كل من الكميات الآتية : (أ) 3.649 cm ، (ب) 20.030 mi ، (جـ) 0.000927 g ،
(د) 15 تفاحة ، (هـ) 3400 s .

8 ـ اذكر عدد الأرقام المعنوية في كل من الكميات الآتية : (أ) 14.67 mm ، (ب) 3.000×10^4 km
(جـ) 0.001 ساعة ، (د) 1100 s ؛ (هـ) $\pi/2$ زاوية نصف قطرية (rad) ؛ (و) 3.77×10^{-6} kg .

9 ـ احسب $(3.44 \times 10^8) \times (34.9 \times 10^3) \div (0.05899)$. اكتب إجابتك بالتدوين العلمي وبالعدد الصحيح من الأرقام المعنوية .

10 ـ احسب $(0.44 \times 10^{-11}) \times (34.49 \times 10^3) \div (0.009)$. دون الإجابة بالتدوين العلمي وبالعدد الصحيح من الأرقام المعنوية .

11 ـ احسب $120\ \text{in} + 39.6\ \text{in} + 13.55\ \text{in} - 21\ \text{in}$. دون الإجابة بالتدوين العلمي وبالضباطة الصحيحة .

12 ـ احسب $13.37 \times 10^3\ \text{m} - 0.0933\ \text{m} + 64\ \text{m}$. دون الإجابة بالتدوين العلمي وبالضباطة الصحيحة .

■ 13 ـ أوجد قيمة كل من : (أ) $(9.1 \times 10^{-31}) \times (14.7 \times 10^6) \div (331 \times 10^{-8})$ ،
(ب) $(13.6 \times 10^{-19})^{1/2}$ ، (جـ) $(3 \times 10^8)^2 \div (1.6 \times 10^{-13})$ ، (د) $(87.66 \times 10^{-5})^{1/2}$

■ 14 ـ أوجد قيمة كل من: (أ) $(0.088 \times 10^{-7})^{3/2}$ ، (ب) $(0.844 \times 10^{12}) \div (3.15 \times 10^{-17})^3 \times (20.3 \times 10^6)$ ،
(جـ) $(27 \times 10^9)^{1/3}$ ؛ (د) $(81 \times 10^3)^{2/3}$.

الأقسام من 1-7 إلى 1-9

15 ـ للذهاب من بيتك إلى محل تجاري معين يتحتم عليك أن تمشي ستة بلوكات إلى الشرق وثلاثة بلوكات إلى الجنوب . ما هي إزاحتك المحصلة (المقدار والزاوية) التي تنجزها في هذه الرحلة ؟ (ب)

16 ـ أوجد الإزاحة المحصلة لسيارة تقطع 13.5 m شمالاً ثم 30 km شرقاً . (ب)

17 ـ خريطة لكنز تقول « ابدأ من عند الشجرة الكبيرة . امش 125 خطوة جنوبًا ثم 40 بزاوية 45° شمال الغرب ثم 60 خطوة غربًا ثم أخيرًا 30 خطوة بزاوية 30° جنوب الشرق » . ما موقع الكنز بالنسبة للشجرة مقدارًا واتجاهًا ؟

18 ـ تقع مدينة هيكسفيل على بعد 220 km في اتجاه 40° شمال الغرب بالنسبة لمدينة كلوتزتاون . وهناك طريق مستقيم يبدأ من هيكسفيل ويتجه شمالاً حيث ينتهي بعد 30 km . عند وصولك إلى نهاية هذا الطريقة ، ما المسافة التي يجب أن تقطعها وفي أي اتجاه لتصل إلى كلوتزتاون ؟ (ب)

19 ـ للوصول من سان لويس إلى ميامي يجب أن تطير الطائرة 1780 km في اتجاه 47° جنوب الشرق . وللوصول من أوتاوا إلى ميامي يجب أن تطير الطائرة في الاتجاه الجنوبي تمامًا مسافة 2060 km . ما المسافة التي يجب أن تطيرها الطائرة وفي أي اتجاه لتصل من سان لويس إلى أوتاوا ؟ (ب)

20 ـ حدثت إزاحة قدرها 35 cm في المستوى xy بزاوية قدرها 57° . أوجد المركبتين x و y لهذه الإزاحة . كرر العمل للزاويتين 122° و 240° .

21 ـ تقع النقطة P على بعد 85 cm من نقطة الأصل لنظام الإحداثيات xy ومركبتها في الاتجاه y هي 33 cm- . أوجد المركبة x للنقطة P وكذلك اتجاه إزاحة P بالنسبة لنقطة الأصل . هناك إجابتان لهذه المسألة . أوجدهما كلتيهما .

22 ـ لنفرض أنك تحرك جسمًا في المستوى xy بادئًا من نقطة الأصل كما يلي : 70 cm بزاوية $\theta = 15°$ ثم 25 cm بزاوية 220° . أوجد المسافة والإزاحة التي حركت بها الجسم .

23 ـ افترض أنك مشيت من نقطة A مسافة قدرها 610 m في اتجاه 20° شمال الغرب ثم اتبعتها بمسافة قدرها 260 m في اتجاه 45° شمال الشرق فانتهيت عند النقطة B . ما إزاحة A بالنسبة إلى B ، وإزاحة B بالنسبة إلى A ؟

24 ـ ركبت دراجتك من النقطة A وقطعت مسافة قدرها 4.55 km شرقًا ، ثم اتخذت مسارًا دائريًا مركزه A حتى وصلت إلى نقطة تقع جنوب A مباشرة . بعدئذ اتجهت شمالاً مسافة 1.80 km فانتهيت عند النقطة B . ما هي إزاحتك عن النقطة A ؟ وما قيمة المسافة التي قطعتها ؟

25 ـ حل المسألة 17 باستخدام حساب المثلثات .

26 ـ حل المسألة 18 باستخدام حساب المثلثات .

27 ـ حل المسألة 19 باستخدام حساب المثلثات .

■■ 28 ـ غرفة ارتفاع سقفها 2.35 m وأبعاد أرضيتها 4.75 m × 5.50 m . أوجد طول الخط القطري من أحد أركان السقف إلى الركن المقابل للأرضية . ما قيمة الزاوية التي يصنعها هذا الخط مع الأرضية ؟

■ 29 ـ متجه **A** مقداره 40 m واتجاهه $\theta = 225°$. إذا أردنا جمع متجه **B** إلى **A** بحيث تكون المحصلة في الاتجاه الموجب للمحور x ومقدارها 20 m ، فماذا يجب أن تكون مركبتا **B** ؟

30 ـ تقع الإزاحتان **A** و **B** في المستوى xy . فإذا كان **A** مقداره 49 cm واتجاهه $\theta = 42°$ ، وكان **B** مقداره 32 cm واتجاهه $\theta = 115°$ ، فما قيمة الإزاحتين **A + B** و **A − B** ؟

■■ 31 ـ عند جمع الإزاحة **B** والإزاحة **A** نحصل على إزاحة **C** مركباتها هي $C_x = -3.70$ cm و $C_y = +2.25$ cm و $C_z = +4.60$ cm . فإذا علمت أن الإزاحتين **A** و **B** في نفس الاتجاه ولكن مقدار **A** يساوي ثلث مقدار **B** فقط ، أوجد مركبات **A** .

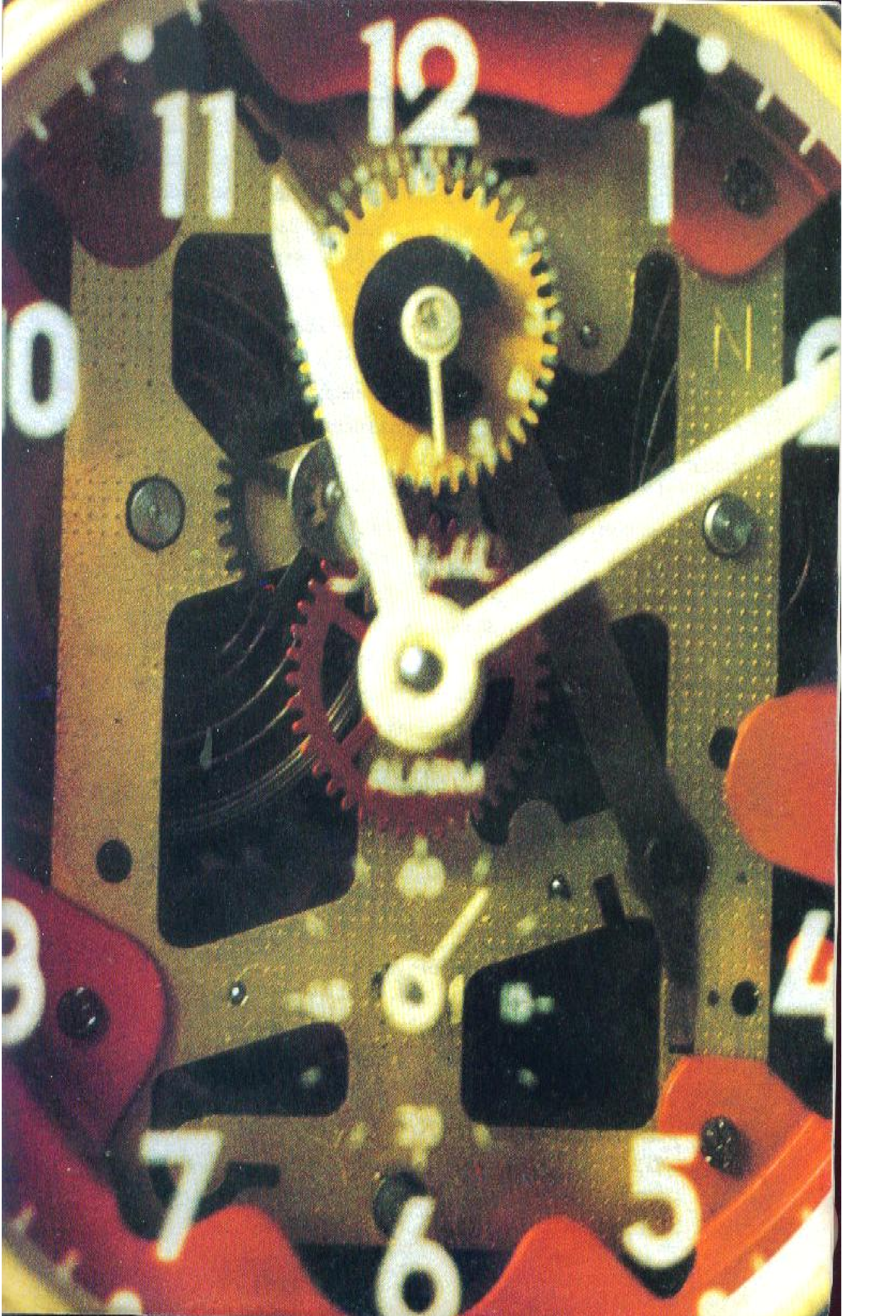
مسائل عامة

■■ 32 ـ تتحرك حشرة صعودًا على الحائط الشمالي لمنزل مسافة 6.5 ft في خط مستقيم يصنع زاوية قدرها 65° بالنسبة للأرضية ، وبهذا تصل الحشرة إلى تقاطع الحائط الشمالي مع الحائط المواجه للشرق بعدئذ تتابع الحشرة حركتها على الحائط (الشرقي مسافة 2.5 ft في اتجاه 25° تحت الأفقي ، وبهذا تنتهي رحلتها عن هذه النقطة . ما هي إزاحة الحشرة من نقطة البداية ؟ ما مقدار الزاوية التي تصنعها الإزاحة بالنسبة للأرضية ؟ وما مقدار الزاوية التي تصنعها مع الحائط الشمالي ؟

■■ 33 ـ منجم يتجه نفق تهويته إلى أسفل مباشرة مسافة 110 m . وعند الطرف السفلي له يوجد نفق العمل الذي يمتد 35 m شرقًا ثم 70 m جنوبًا حيث ينتهي . ما قيمة الإزاحة من بداية نفق التهوية إلى نهاية نفق العمل ؟ وما هي الزاوية التي تصنعها هذه الإزاحة بالنسبة للخط الرأسي ؟

■ 34 ـ يتحرك قارب مسافة مستقيمة طولها 4.3 mi . وعند نهاية هذه الإزاحة يكون القارب على بعد 1.6 mi من نقطة البداية . أوجد اتجاه تحرك القارب وعلى أي بعد تقع نقطة النهاية شمال أو جنوب نقطة البداية . هناك إجابتان محتملتان وعليك إيجادهما . (ب) .

■■ 35 ـ تقع مدينة مينيا بوليس على بعد 400 mi شمال غرب (أي بزاوية 45° غرب الشمال) مدينة شيكاغو . وتنطلق طائرة من مينيا بوليس في اتجاه 10° غرب الجنوب بينما تنطلق طائرة أخرى من شيكاغو في اتجاه 45° غرب الجنوب . ما هي إزاحة نقطة تقاطع مساري الطائرتين بالنسبة لشيكاغو ؟ وبالنسبة لمينابوليس ؟



الجزء الأول

الميكانيكا

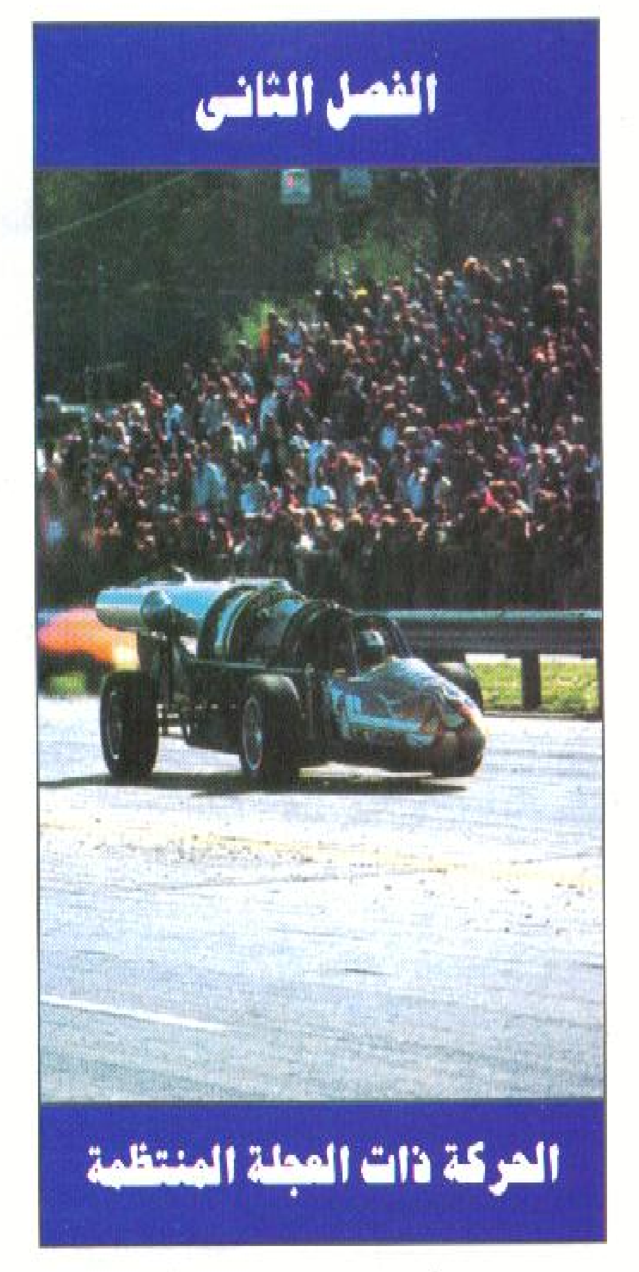
«العلم يشبه الهواء الذى نتنفسه إلى حد ما - فهو موجود فى كل مكان»

دوايت إيزنهاور

تبدأ دراستنا للفيزياء بموضوع الميكانيكا ، إذ أن الميكانيكا هدفها فهم وشرح حركة الأجسام المادية وكذلك شروط سكونها . وقد نتساءل عند الوهلة الأولى عن أهمية هذه الدراسة . ولكن الواقع أن المبادئ الأساسية القليلة للميكانيكا هى التى تمكننا من فهم حركة النجوم والكواكب ، وبناء الجسور (الكبارى) وناطحات السحاب ، وتطيير الطائرات ووضع الأقمار الصناعية فى مداراتها . علاوة على ذلك فإن الكثير من مبادئ الميكانيكا ، كالقوة والطاقة وكمية التحرك ، تلعب دورًا هامًا فى دراسة الفروع الأخرى من الفيزياء .

وبالرغم من أن الكثير من الفلاسفة القدامى قد حاولوا شرح وتفسير أسباب حركة الأجسام وكيفية حركتها إلا أنه لم يتم وضع نظرية منظمة للحركة قبل القرن السابع عشر . ويعود الفضل الأعظم فى هذا الشأن إلى إنجازات عالمين عظيمين هما جاليليو ونيوتن . فقد نشر نيوتن أول قوانين للحركة فى كتابه « المبادئ » عام 1687 حيث أدخل مفهوم الكتلة باعتبارها كمية المادة ومفهوم القوى بين الأجسام كسبب للتغيير فى حركتها . كذلك وضع نيوتن الوصف الرياضى للجاذبية كقوة أساسية تسبب تجاذب الأجسام مع بعضها البعض . وقد أثبت مفهوم الجاذبية العام هذا أن حركة الكواكب فى الفضاء وحركة الأجسام الساقطة تجاه الأرض يحكمهما نفس المبدأ .

وقد ظلت قوانين نيوتن تعطى وصفًا مقبولاً لكل الظواهر الميكانيكية المعروفة لفترة تزيد عن مائتى عام . وقرب نهاية القرن التاسع عشر بدأت الفيزياء فى التنقيب فى عالم الظواهر فائقة الصغر وفائقة السرعة مثل تركيب الذرات وسلوك الأجسام التى تتحرك بسرعة تقترب من سرعة الضوء . ومع بداية القرن العشرين أصبح واضحًا أن من الضرورى تعديل نظرية نيوتن لكى تستطيع شرح هذه الظواهر الجديدة ، والتى تبعد كثيرًا عن نطاق خبرتنا اليومية . وقد أثبتت نتائج هذه التعديلات ؛ وبالتحديد النسبية وميكانيكا الكم ، نجاحها الباهر فى شرح وتفسير الحركة والتركيب الميكانيكى فى تلك الحالات .



الحركة إحدى أكثر الظواهر الفيزيائية وضوحًا علـى الإطـلاق ، ولذلك فإنـها تمثـل بداية ممتازة لدراسة الفيزياء . ولكن قبل أن نستطيع دراسة الحركة علينا أن نفهم كيفية وصفها كميًا . هذا الوصف الكمى للحركة لن يكون ممكنًا إلا بعد تعريف بعض خواصـها الأساسية مثل الإزاحة والسرعة والعجلة بدلالة أبعاد الطول والزمن . ويسمى علم وصـف الحركة كميًا دون الرجوع إلى أسبابها الفيزيائية **بالكينمانيكا** ، وهو موضوع هـذا الفصـل . وفى فصول تالية ، عندما نبحث فى أمر القوة والطاقة ، سوف ندرس أسباب الحركة . ودراسة العلاقة بين الحركة وأسبابها تسمى **الديناميكا** .

2-1 وحدات الطول والزمن

لتعريف الكميات التى تصف الحركة يجب علينا أولاً تعريف الوحدات الأساسية للطول والزمن .الوحدة الأساسية للطول فى النظام SI هى المتر . وقد كان المتر يعرف فيما سبق

بأنه طول قضيب معدنى معيارى محفوظ فى المكتب الدولى للأوزان والمقاييس فى سيفريه بفرنسا . هذا القضيب يمثل جزءًا واحدًا من عشرة ملايين جزء من المسافة بين القطب الشمالى وخط الاستواء مقاسة على خط الطول المار بباريس . ولك أن تتخيل مدى الصعوبة فى قياس هذه المسافة فعليًا . ومع التطور المذهل فى مجال الليزر والأجهزة البصرية الحديثة أصبح الضوء يمدنا بأكثر الطرق ضباطة لقياس الطول والزمن . وهكذا ، ومنذ عام 1983 ، فإن المتر يعرف الآن بدلالة سرعة الضوء فى الفراغ .

1 متر = المسافة التى يقطعها الضوء فى الفراغ فى زمن قدره 1/299,792,458 ثانية .

وحدة الزمن فى النظام SI هى الثانية ، وتعرف بدلالة تردد الضوء المنبعث فى عملية ذرية محددة .

1 ثانية = الزمن الذى تستغرقه 9,192,631,770 دورة بالضبط من طول موجى معين للضوء المنبعث من ذرات السيزيوم .

وإن كان يبدو أن هذين التعريفين اختياريان ، فهذا لأنهما كذلك بالفعل . لكنهما ، مع ذلك ، معرفان بتجارب ضبيطة سهلة الإجراء والتحقيق (لاحظ العدد الكبير من الأرقام المعنوية) ، فالعلماء فى كل مكان فى العالم (أو الكون) يستطيعون مطابقة قياس هاتين الوحدتين دون الحاجة إلى نقل أى أشياء أو أجسام معيارية لأغراض المقارنة .

2-2 مقدار السرعة (معدل الحركة)

عندما تقول أن سيارة تتحرك بسرعة مقدارها 80 km/h يستطيع أى إنسان أن يفهم ما تعنيه وهو أن السيارة ستقطع مسافة قدرها 80 km فى 1 h بشرط أن يظل هذا المعدل ثابتًا . معنى ذلك أيضًا أن السيارة ستقطع $0.5 \times 80 = 40$ km, فى 0.5 h وتقطع $2 \times 80 = 160$ km فى 2 h . وعمومًا فإن المسافة التى تقطعها السيارة عندما يظل معدل حركتها ثابتًا هى :

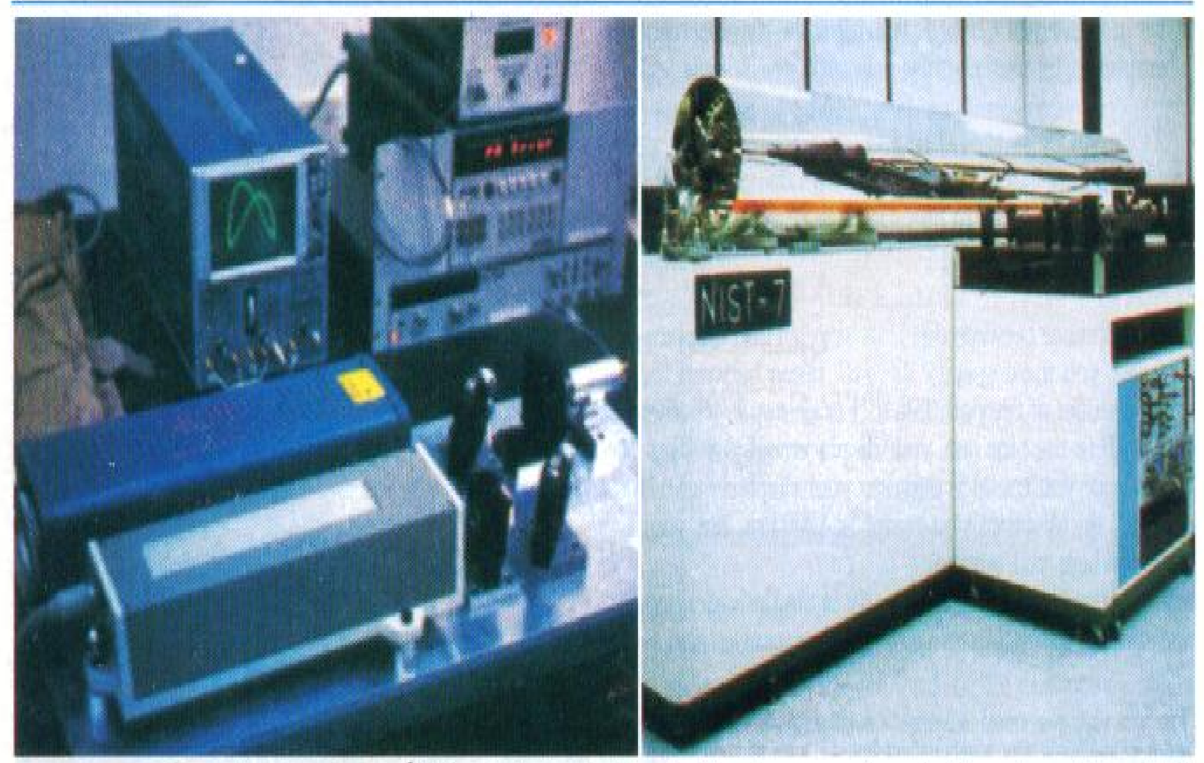
الزمن × مقدار السرعة = المسافة المقطوعة

وبحل هذه المعادلة نحصل على معادلة إيجاد مقدار السرعة :

$$\text{مقدار السرعة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن المار}} \qquad (2-1)$$

وتستخدم نفس هذه المعادلة لتعريف متوسط مقدار سرعة السيارة حتى إذا كان معدل الحركة غير ثابت . فإذا كانت السيارة تقطع 200 km فى 4h فإن متوسط مقدار سرعتها يكون :

$$\text{متوسط مقدار السرعة} = \frac{200\ \text{km}}{4.0\ \text{h}} = 50\ \text{km/h}$$



معيارا الزمن والطول . ساعة السيزيوم (الصورة اليسرى) هى المعيار الأساسى لقياس الزمن فى معهد المعايير والتكنولوجيا (NIST) . هذا الجهاز يمكنه قياس الزمن بدقة قدرها 0.000 003 s فى السنة . ويستخدم NIST ليزر الهيليوم ـ نيون المنظم باليود (الصورة اليمنى) كمعيار للطول . ودقة الليزر فى قياس المتر المثالى عالية جدًا وتساوى 0.000 000 000 1 m .

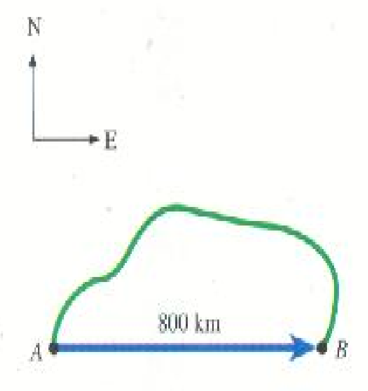
وكما ترى فإن وحدات مقدار السرعة هى وحدة مسافة مقسومة على وحدة زمن . فمثلاً ، متوسط مقدار سرعة القوقع حوالى 1.5 mi/yr . أى أن متوسط مقدار السرعة يساوى المسافة المقطوعة مقسومًا على الزمن المار دائمًا .

لاحظ أن مقدار السرعة كمية قياسية ليس لها اتجاه . فعداد سرعة السيارة يقيس مدى سرعتها أو بطئها فقط ولا يفيدنا بأى شىء عن اتجاه حركتها . فالسيارة قد تكون متحركة على طريق مستقيم فى البرارى أو دائرى فى حلبة السباق ويظل معدل حركتها 100 km/h حتى وإن كانت تقطع 200 km فى 2 h .

2-3 الإزاحة والسرعة المتوسطة

فى أحاديثنا اليومية تستخدم المصطلحان « السرعة ومقدار السرعة » بنفس المعنى ، ولكنهما فى العلم يحملان معنيين مختلفين ، وسوف نرى أن السرعة كمية متجهة (بخلاف مقدار السرعة (معدل الحركة) إذ أنه كمية قياسية) . لنستنتج الآن تعريف السرعة :

لنفرض أن A و B مدينتان وأن B تقع على بعد 800 km شرق A مباشرة ، كما هو مبين فى الشكل 1-2 . هناك طرق عديدة يمكن استخدامها للسفر من A إلى B وعلينا أن نقطع فى كل منها **مسافة** مختلفة . أحد هذه الطرق هو الطريق الأخضر فى الشكل 1-2 وطوله 1200 km . ولكن **أقصر** مسافة هى الخط المستقيم من A إلى B وطولها 800 km ، وهى الممثلة بالمتجه الأزرق **s** فى الشكل 1-2 . وطبقًا لما درس فى الفصل الأول يسمى **s** بالإزاحة من A إلى B* وسنكرر هنا للتوضيح تعريف الإزاحة الذى استخدمناه فى الفصل الأول .



شكل 1-2 :

الإزاحة s من A إلى B تساوى 800 km تجاه الشرق .

* قد نستخدم رموز أخرى مثل **x** مثل **r** لتمثيل الإزاحة فى مناسبات أخرى . ذلك أنه يمكننا استخدام أى رموز جبرية لتمثيل الإزاحة أو غيرها من الكميات .

الإزاحة بين أى نقطتين هى متجه يمتد من إحدى النقطتين إلى الأخرى ، ومقدار هذا المتجه هو طول المسافة المستقيمة بين هاتين النقطتين .

يمكنك إذن أن تتبين من الشكل 1-2 الفرق بين المسافة المقطوعة والإزاحة . ولذلك فلكى تحدد المسافة المقطوعة لابد من تحديد المسار المتبع بين النقطتين ، أما الإزاحة فلا تعتمد على المسار . ذلك أن إزاحتك ستظل 800 km سواء اتبعت المسار الأخضر من A إلى B أو المسار الأزرق . فإذا اتبعت المسار الأزرق ستكون المسافة التى تقطعها مساوية للإزاحة ، أما إذا أخذت الطريق الأخضر ستكون المسافة المقطوعة 1200 km ، ولكن الإزاحة تبقى 800 km من نقطة البداية .





الطائرة (الكونكورد) والسفينة (الملكة إليزابيث الثانية) بعبران المحيط الأطلنطى . ولكن (الكونكورد) تستغرق فى ذلك أقل من 3 ساعات ، بينما تحتاج (الملكة إليزابيث الثانية) إلى أكثر من 3 أيام .

بنفس الطريقة يمكننا تعريف الفرق بين متوسط مقدار السرعة والسرعة المتوسطة . وقد رأينا فى القسم 2-2 أن متوسط مقدار السرعة يعرف بدلالة المسافة المقطوعة ، ومن ثم فإنها تعتمد على المسار المتبع أثناء الحركة . أما السرعة المتوسطة ، من ناحية أخرى ، فهى متجه يعرف بأنه الإزاحة من نقطة البداية إلى نقطة النهاية مقسومة على الزمن المار :

$$\text{السرعة المتوسطة} = \frac{\text{متجه الإزاحة}}{\text{الزمن المار}}$$

وبالرموز :

$$\bar{v} = \frac{s}{t} \qquad s = \bar{v}t \qquad (2\text{-}2)$$

حيث تستخدم الشرطة فوق الحرف v للدلالة على أننا نعنى السرعة المتوسطة . لاحظ أن $\bar{v}$ تتناسب مع s ؛ لذلك فإن السرعة كمية متجهة واتجاهها هو نفس اتجاه متجه الإزاحة . وحيث أن الإزاحة s فى الشكل 1-2 فى اتجاه الشرق فإن v تكون متجهة شرقًا أيضًا .

ولإيضاح الفرق بين متوسط معدل الحركة والسرعة المتوسطة ، لندرس المثال العددى الآتى : لنفرض أن سيارة تستغرق 20 h للوصول من المدينة A إلى المدينة B إذا اتخذت المسار الأخضر فى الشكل 1-2 . وحيث أن s = 800 km فى اتجاه الشرق والزمن t = 20 h فإن

السرعة المتوسطة للسيارة تكون :

$$\bar{v} = \frac{800 \text{ km east}}{20 \text{ h}} = 40 \text{ km/h}$$

فى اتجاه الشرق أيضًا . (لاحظ أن السرعة المتوسطة متجه له مقدار هو 40 km/h واتجاه هو (الشرق) : أما متوسط مقدار السرعة :

$$\text{متوسط معدل الحركة} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن المار}} = \frac{1200 \text{ km}}{20 \text{ h}} = 60 \text{ km/h}$$

نقطة هامة : ليس من الضرورى أن يكون مقدار سرعة جسم ما مساويًا لسرعته المتوسطة .

ملاحظة أخيرة قبل متابعة الموضوع :عند العودة إلى نقطة البداية تكون الإزاحة ، والسرعة المتوسطة بالتالى صفرًا ، بصرف النظر عن المسافة المقطوعة . ذلك أنك قد تقطع مسافة كبيرة بمعدل حركة معين ، ولكن إذا ابتدأت وانتهيت عند نفس النقطة فإن إزاحتك تكون صفرًا .



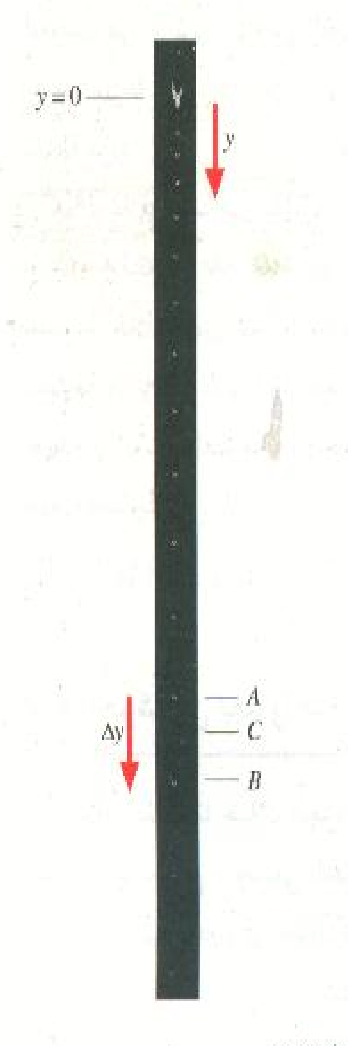
يغير الجسم اتجاه حركته إذا كان المسار منحنيا .

2-4 السرعة اللحظية

لندرس الآن حركة سقوط جسم كالذى توضحه الصورة فى الشكل 2-2 . هذه الصورة تبين موضع الكرة على فترات زمنية منتظمة ، وقد تم التقاطها باستخدام ضوء وميضى تتكرر ومضاته بنفس المعدل ، ولنفرض أن Δt (وتقرأ دلتا تى) هى الفترة الزمنية بين ومضتين متتاليتين . لاحظ أن الكرة تتسارع أثناء السقوط ، وهذا واضح من زيادة المسافة خلال كل فترة زمنية تالية . ولنناقش الآن طريقة تعيين سرعة الكرة عند مرورها بنقطة ما ولتكن C ، وتسمى السرعة عند نقطة معينة **بالسرعة اللحظية** عند تلك النقطة .

من الواضح أن اتجاه السرعة هنا رأسى إلى أسفل لأنه هو نفس اتجاه الحركة . ولإيجاد قيمة تقريبية لمقدار سرعة الكرة عند C يمكننا حساب السرعة المتوسطة بين النقطتين A و B . لنسمى إحداثى قياس موضع الكرة y . إذن ، عندما تنتقل الكرة من A إلى B تكون إزاحتها Δy . وحيث أن Δt هو الزمن بين ومضتين متتاليتين من الضوء فإن الزمن الذى تستغرقه الكرة للانتقال من A إلى B يكون أيضا Δt . وعليه ، فمتوسط سرعة الكرة فى المنطقة من A إلى B هو :

$$\bar{v} = \frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

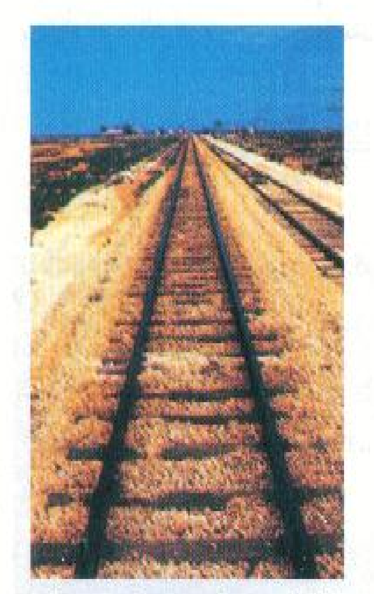


شكل 2-2
يبين الضوء الوميضي مواضع الكرة عند لحظات زمنية متتالية والكرة تسقط من A إلى B فى زمن قدره Δt (مركز تطوير التعليم) .

لكن هذه ليست سرعة الكرة عند C بالضبط لأن السرعة تتزايد باستمرار . وإذا زادت سرعة الومضات الضوئية (أى إذا قلت Δt) ستصبح صور الكرة أكثر قربًا من بعضها البعض وتصبح النقطتان A و B أكثر قربًا إلى C . فإذا ما أجرينا حساباتنا بالنسبة

لهاتين النقطتين الجديدتين A و B فإن السرعة المتوسطة التى نحصل عليها لابد أن تكون أقرب إلى سرعة الكرة عند C من القيمة الأولى السابق حسابها .

وبهذا يمكننا أن نتخيل حالة تكون فيها الومضات الضوئية من السرعة بحيث تقترب الفترة الزمنية بين الومضات من الصفر ، وهو ما نمثله هكذا $\Delta t \to 0$. وعندئذ تصبح النقطتان A و B قريبتين جدًا من C وبدرجة تمكننا من اعتبار أن السرعة المتوسطة التى نحسبها مساوية تماما للسرعة عند C . وعندئذ تسمى السرعة عند C بالسرعة الحظية عند هذه النقطة وتمثل بالحرف $\mathbf{v}$ (بدون الشرطة العلوية) . وبدلالة الطريقة العلمية السابق شرحها ، تعرف السرعة اللحظية إذن كالتالى :



حركة القطار على قضبان السكة الحديد فى سهل نلابور باستراليا الجنوبية كمثال للحركة فى بعد واحد . قضبان السكة الحديد لا تغير اتجاهها لمسافة تزيد عن 200 ميلاً .

$$\text{السرعة اللحظية} = \mathbf{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} \qquad (2\text{–}3)$$

ويقرأ الرمز $\lim_{\Delta t \to 0}$ هكذا (فى الحالة الحدية عندما تقترب Δt من الصفر) . هذا التعريف هو التمثيل الرياضى للطريقة العلمية التى تكون فيها Δt من الصغر بحيث تصبح السرعة المتوسطة بين A و B مساوية أساسًا للسرعة اللحظية عند C ، وبأى ضباطة نريد .

هناك علاقة هامة بين مقدارى السرعة اللحظية عند نقطة مثل C ومعدل الحركة عند C . إذا كانت Δt صغيرة جدًا لن يتمكن الجسم من تغيير اتجاه حركته بدرجة محسوسة خلال الزمن الذى يستغرقه للانتقال من A إلى B ، ونتيجة لذلك تكون المسافة المستقيمة من A إلى B مساوية للمسافة التى يقطعها الجسم عند انتقاله من A إلى B . وحيث أن المسافة المقطوعة والإزاحة متساوى المقدار فإن السرعة اللحظية ومعدل الحركة عند C متساويان فى المقدار أيضًا .

مقدار السرعة اللحظية عند نقطة ما يساوى معدل الحركة اللحظى عند تلك النقطة .

2-5 الحركة فى بعد واحد



ستقتصر مناقشتنا خلال الجزء الأعظم مما يبقى فى هذا الفصل على الحركة على استقامة خط مستقيم ، وتسمى الحركة فى بعد واحد . وسوف نتعلم كيفية تعميم النتائج على الحركة فى بعدين فى فصول لاحقة .



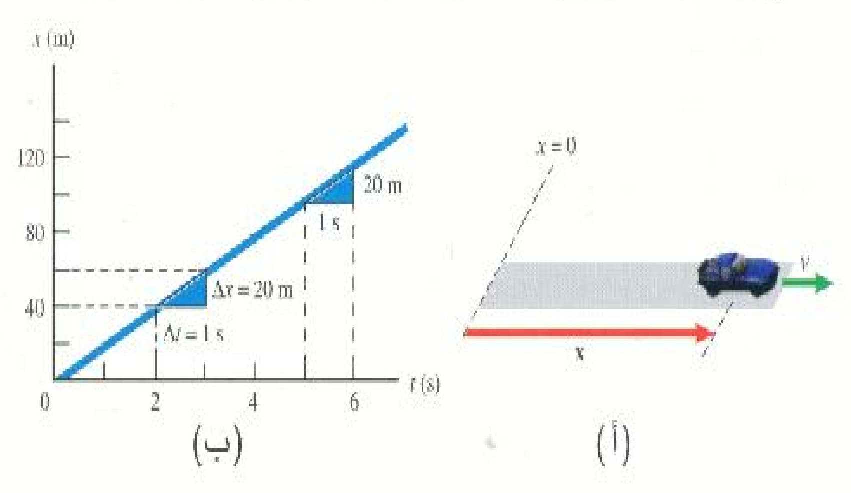
عداء ينطلق متسارعا من نقطة البداية .

اعتبر السيارة الموضحة فى الشكل 3–2 أ كمثال للحركة فى بعد واحد . ولنفترض أن حركة السيارة عند اللحظة المبينة تكون فى الاتجاه الموجب للمحور x ، وبالتالى يكون المتجه الممثل لسرعتها فى هذا الاتجاه أيضًا . أما إذا عكست السيارة اتجاهها فستكون سرعتها فى الاتجاه السالب للمحور x . وهكذا يمكن تعريف الاتجاه فى حالة الحركة فى بعد واحد بالإشارتين الموجبة والسالبة .

لنناقش حركة السيارة المبينة فى الشكل 3-2 أ . لنعتبر أن **x** يمثل مقدار إزاحة السيارة عن مركز الإحداثيات عند اللحظة t ، ولنفترض أنها كانت عند $x = 0$ فى اللحظة $t = 0$ وأنها تتحرك بمعدل قدره 20 m/s . وبتسجيل موضع السيارة مرة كل ثانية سنجد أن موضع السيارة كدالة فى الزمن يمكن تمثيله كما فى الجدول الآتى :

t(s) :	0	1	2	3	4	5	6
x (m):	0	20	40	60	80	100	120

هذا الجدول يبين أن مقدار إزاحة السيارة يتزايد بمقدار 20 m كل ثانية . وبتمثيل هذه النتائج فى صورة منحنى يبين x كدالة فى t سوف نحصل على الشكل 3-2 ب .



شكل 3-2 :
يمكن تمثيل الحركة على استقامة خط مستقيم بالرسم البيانى . معدل حركة السيارة فى هذه الحالة ثابت ويساوى 20 m/s .

المثلثان الصغيران فى الجزء ب من الشكل لهما معنى فى غاية الأهمية لاحظ أن الضلع الرأسى يمثل 20 m وأن الضلع الأفقى يمثل 1 s . وهكذا فإن هذين المثلثين يوضحان لنا أن السيارة تسير 20 m فى الاتجاه الموجب للمحور x فى كل ثانية . وحيث أن الضلع الرأسى ، وطوله Δx هو الإزاحة التى تعانيها السيارة خلال الفترة الزمنية Δt ، فإن السرعة المتوسطة للسيارة تكون :

$$\bar{v} = \frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن اللازم}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

حيث Δx الإزاحة وهى متجه فى الاتجاه الموجب للمحور x . فإذا كانت Δx موجبة تكون السرعة فى الاتجاه الموجب للمحور x ، وإذا كانت سالبة تكون فى الاتجاه السالب للمحور x . أى أنه يمكن استخدام أى من المثلثين الموضحين فى الشكل 3-2 ب لإيجاد سرعة السيارة .

لنرجع الآن إلى الكرة الساقطة الموضحة فى الشكل 2-2 كمثال آخر للحركة فى خط مستقيم . السرعة فى هذه الحالة تتزايد باستمرار ولا تظل ثابتة . وبقياس موضع الكرة الساقطة y على الصورة الفوتوغرافية كدالة فى الزمن نحصل على البيانات الموضحة بالجدول الآتى :

t(s) :	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
x (m):	0	0.20	0.78	1.76	3.14	4.90	7.06	9.60	12.5

لاحظ أن الإزاحة $\Delta\mathbf{y}$ متجه أُخذ اتجاهه الموجب رأسيًا إلى أسفل . هذه النتائج ممثلة بيانيًا فى الشكل 4-2 ، ولإيجاد السرعة المتوسطة بين النقطتين A و B من الرسم يجب حساب $\Delta\mathbf{y} \;/\; \Delta t$. ويمكننا أن نلاحظ من الرسم أن $t_B - t_A = \Delta t = 0.100 - 0.080 = 0.020$ s ، وباستخدام الجدول أو الرسم نجد أن $y_B - y_A = \Delta\mathbf{y} = 4.90 - 3.14 = +1.76$ cm ، ومنه

$$\bar{\mathbf{v}}_{AB} = \frac{\Delta\mathbf{y}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{y}_B - \mathbf{y}_A}{t_B - t_A} = \frac{+1.76\ \text{cm}}{0.020\ \text{s}} = +0.88\ \text{cm/s}$$

شكل 4-2 :
شكل بيانى لنتائج تجربة كالمبينة بالشكل 2-2 .

وهذه هى السرعة المتوسطة بين A و B ، فى حدود خطأ التجربة . وحيث أن $\bar{\mathbf{v}}_{AB}$ موجبة الإشارة فإنها تكون فى الاتجاه الموجب ؛ أى رأسية إلى أسفل وهكذا فإن طول الضلع الرأسى فى الشكلين 3-2 ب ، و 4-2 ويسمى **الارتفاع** ، مقسومًا على طول الضلع الأفقى ، ويسمى **زمن الارتفاع** ، يعطى السرعة المتوسطة . ولعلك تذكر من دراستك السابقة فى الرياضيات أن هذه النسبة هى **ميل** الخط المثل للضلع الثالث للمثلث . الكمية $\Delta\mathbf{y} \;/\; \Delta t$ فى الشكل 4-2 هى إذن ميل الخط الواصل بين A و B . وبذلك نصل إلى الاستنتاج الآتى :

السرعة المتوسطة بين أى نقطتين A و B على منحنى الإزاحة مقابل الزمن هى ميل الخط لمستقيم الموصل بين النقطتين .

وفى الحالة الحدية عندما تكون النقطتان A و B متقاربتين جدًا سوف يصبح الخط الواصل بينهما مماسًا* للمنحنى إذن :

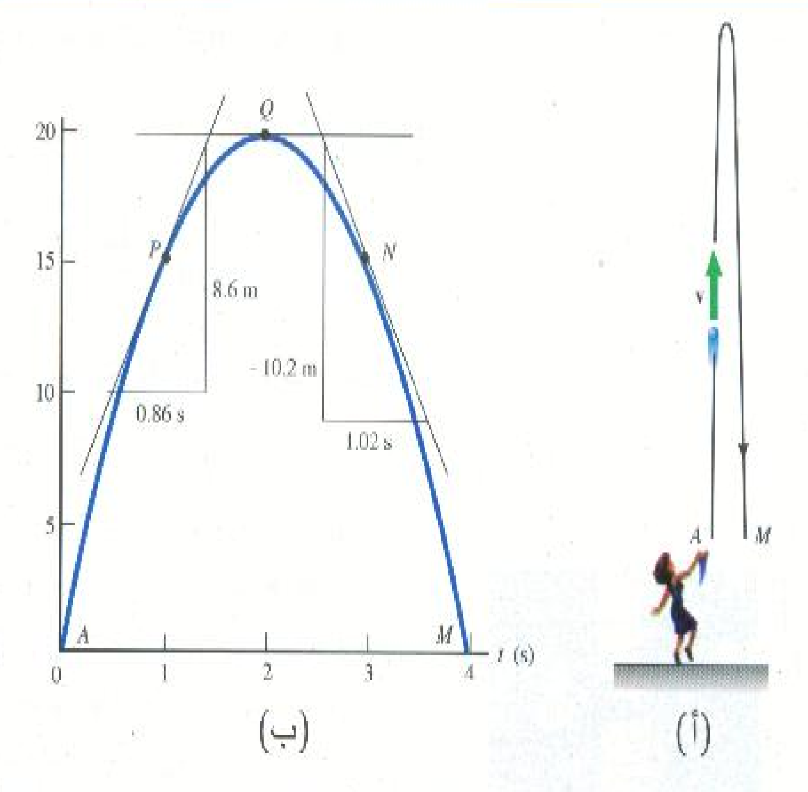
ميل منحنى الإزاحة مقابل الزمن عند أى نقطة يساوى السرعة اللحظية عند تلك النقطة .

وهكذا فإننا نرى الأهمية الكبرى لماس المنحنى المثل للإزاحة مقابل الزمن ، إذ أنه يعطينا السرعة اللحظية للجسم المتحرك .

مثال توضيحى 1-2

يمثل الشكل 5-2 أ كرة قذفت إلى أعلى ، ويوضح الشكل 5-2 ب إحداثى الكرة كدالة فى الزمن ، والمطلوب إيجاد السرعة اللحظية .

* الخط الماسى لنقطة على منحنى (هناك مماس واحد لكل نقطة) هو ذلك الخط المار بتلك النقطة ، ولكنه لا يمس أو يقطع أى نقط أخرى على المنحنى .



شكل 5-2 :
(أ) حركة خطية (أسلسا) ،
(ب) نفس الحركة ممثلة بيانيًا .

ولنوجد أيضًا السرعة المتوسطة (d) بين النقطتين A و Q والسرعة المتوسطة (e) بين A و M .

استدلال منطقى : يبين الشكل أن الكرة تصل إلى ارتفاع قدره 20 m ثم تبدأ فى السقوط .

ونظرًا لأن v عند أى نقطة تعطى بميل الخط المماسى عند تلك النقطة ، إذن :

(أ) ارسم مماسا للمنحنى عند النقطة P :

$$\mathbf{v}_P = \text{الميل عند } P = \frac{8.6 \text{ m}}{0.86 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}$$

(ب) بالمثل :

$$\mathbf{v}_Q = \text{الميل عند } Q = 0$$

وعند Q تتوقف الكرة ثم تبدأ فى السقوط .

(جـ)

$$\mathbf{v}_N = \text{الميل عند } N = \frac{-10.2 \text{ m}}{1.02 \text{ s}} = -10 \text{ m/s}$$

والإشارة هنا سالبة لأن الميل سالب عند N . الآن تصبح الكرة متحركة فى الاتجاه السالب للمحور y ، أى أنها ساقطة الآن . ويلاحظ أن ميل المنحنى يعطى كلاً من مقدار واتجاه السرعة ، فالميل السالب يعنى أن السرعة فى الاتجاه السالب للمحور y .

(د) ارسم خطًا مستقيمًا (وترًا) بين A و Q (وهو غير مبين بالشكل) . هذا الوتر يرتفع 20 cm فى 2.0 s . وحيث أن : $\overline{\mathbf{v}} = \frac{\text{الارتفاع}}{\text{زمن الارتفاع}}$ ، إذن :

$$\mathbf{v}_{AQ} = \text{ميل الوتر من } A \text{ إلى } Q = \frac{20 \text{ m}}{2.0 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}$$

(هـ) إذن :

$$\bar{\mathbf{v}}_{AM} = M \text{ إلى } A \text{ ميل الوتر من } = \frac{0\ \text{m}}{4.0\ \text{s}} = 0\ \text{m/s}$$

ومن الواضح أن هذه النتيجة صحيحة لأن الكرة عند A و M تكون فى نفس الموضع ، لأن الإزاحة الكلية تساوى صفرًا . وعليه :

$$\bar{\mathbf{v}}_{AM} = \frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن المار}} = \frac{0\ \text{m}}{4.0\ \text{s}} = 0\ \text{m/s}$$

وكما أشرنا سابقاً ، فإن التعريف العلمى للسرعة المتوسطة يختلف عن تعريف معدل الحركة . ■

2-6 العجلة (التسارع)



مثال لحركة السقوط الحر .

لنفرض أن $\mathbf{v}_0$ سرعة جسم فى لحظة معينة (وليس معدل حركته) ، وأن $\mathbf{v}_f$ سرعته فى لحظة تالية . (الدليلان السفليان 0 و f مأخوذان من كلمة « original » بمعنى أصلى أو ابتدائى وكلمة « final » بمعنى نهائى) .

تعرف العجلة المتوسطة $\bar{\mathbf{a}}$ للجسم خلال هذه الفترة الزمنية بالمعادلة :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\text{التغير فى السرعة}}{\text{الزمن المار}} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t} \qquad (2\text{-}4)$$

أى أن العجلة هى التغير فى السرعة (وليس معدل الحركة) لوحدة الزمن ، ووحدة العجلة هى وحدة السرعة مقسومة على وحدة الزمن ، أى وحدة طول مقسومة على مربع وحدة الزمن ، وهى m/s^2 فى النظام SI .

ولكى نرى معنى هذا التعريف فى المواقف العملية ، لنعتبر سيارة تبدأ من السكون وتصل إلى معدل حركة قدره 20 m/s خلال زمن قدره 12 s عندما تسير فى الاتجاه الموجب للمحور x . معطياتنا هنا هى السرعة الابتدائية $\mathbf{v}_0 = 0$ والنهائية $\mathbf{v}_f = 20$ m/s وكلتاهما فى الاتجاه الموجب للمحور x ، والزمن المار $t = 12$ s . إذن :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t} = \frac{20\ \text{m/s} - 0\ \text{m/s}}{12\ \text{s}} = 1.7\ \text{m/s}^2$$

حيث تعنى الإشارة الموجبة أن العجلة متجه فى الاتجاه الموجب للمحور x .

لنفرض أن السيارة تستمر فى الحركة فى الاتجاه الموجب للمحور x ، ولكنها تتباطئ من 20 m/s إلى 0 m/s خلال 12 s . ستكون العجلة المتوسطة فى هذه الحالة :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t} = \frac{0\ \text{m/s} - 20\ \text{m/s}}{12\ \text{s}} = -1.7\ \text{m/s}^2$$

لاحظ أن الإشارة سالبة الآن ، وتذكر أن إشارة المتجه تبين اتجاهه . وحيث أننا قد اتفقنا سابقاً على أن المتجهات الموجبة هى تلك التى تشير إلى الاتجاه الموجب للمحور x ، فإن الإشارة السالبة للعجلة $\mathbf{a}$ تبين أنها متجهة فى الاتجاه **السالب** للمحور x ، أى

عكس اتجاه الحركة هذا هو حركة الجسم فى حالة التباطؤ ، والذى يسمى عادة بالتقاصر ، لكننا نفضل استخدام مصطلح **العجلة السالبة** . لنؤكد الفكرة الأساسية هنا :

عند التعامل مع المتجهات أحادية البعد لديك مطلق الحرية فى اختيار أحد الاتجاهين الممكنين كاتجاه موجب لمتجهاتك . فإذا ما حسمت هذا الاختيار فى مسألة معينة ، يجب عليك استخدام الإشارة الصحيحة لجميع المتجهات الداخلة فى عملية حساب المتجهات . وعندئذ ستبين إشارة المتجه الناتج من العملية الحسابية اتجاه هذا المتجه .

مثال 2-1 :

يمثل الشكل 5-2 ب التغير الزمنى للموضع الرأسى (y) لكرة مقذوفة رأسيًا إلى أعلى . ارسم رسمًا بيانيًا لسرعة الكرة مقابل الزمن وأوجد عجلتها .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف تستنتج السرعة من الشكل 5-2 ب ؟

الإجابة : طبقًا لما سبق شرحه فى المثال التوضيحى 1-2 ، السرعة عند أية لحظة هى ميل منحنى y مقابل t عند تلك اللحظة . وقد سبق حساب الميل عند النقط P ، Q و N المناظرة للأزمنة 3.0 s ، 2.0 و 1.0 على الترتيب . اختر عدة نقط أخرى (كل 0.5s مثلًا) وارسم مماسًا للمنحنى عند كل منها بأقصى دقة ممكنة ثم احسب الميل عند كل نقطة . وتحقق من مدى تطابق نتائجك مع النتائج المعطاة فى الجدول الآتى :

Time(s) :	→	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Velocity (m/s):	→	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20

وكما رأينا سابقًا ، فإن الإشارات السالبة لبعض السرعات تعنى أن الجسم يتحرك فى الاتجاه السالب للمحور y .

سؤال : كيف تمثل هذه النتائج بيانيًا ؟

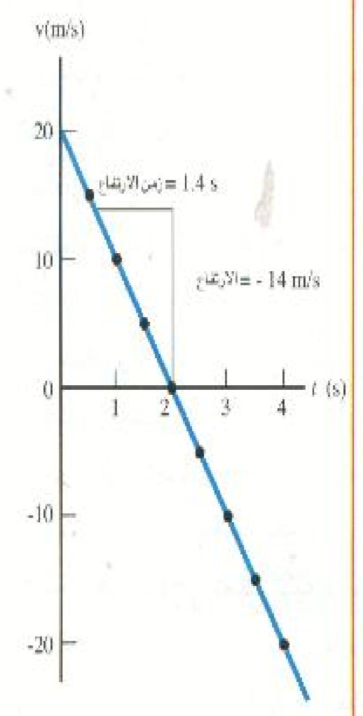
الإجابة : تمثل قيم **v** على المحور y وقيم t على المحور الأفقى . (هذا ما يقصد برسم **v** مقابل t أو **v** كدالة فى t) . اختر مقياسى الرسم اللذين يغطيان مدى بياناتك ، وعندئذ ستحصل على رسم بيانى كالمبين بالشكل 6-2 .

سؤال : ما علاقة العجلة بهذا الرسم البيانى ؟

الإجابة : العجلة هى ميل هذا المنحنى ، تمامًا كما أن السرعة هى ميل المنحنى الذى يمثل الموضع كدالة فى الزمن (شكل 5-2 ب) .

سؤال : من الواضح أن المنحنى الناتج عبارة عن خط مستقيم ذى ميل سالب . ما معنى هذا ؟

الإجابة : ميل الخط المستقيم ثابت عند جميع نقطة . والخط المستقيم يعنى فى هذه الحالة المعنية أن الحركة ذات عجلة منتظمة . ونظرًا لأن الميل سالب فذلك يعنى أن **a** سالبة .



شكل 6-2 :
تغير السرعة مع الزمن للكرة الممثلة بالشكل 5-2 أ . ما قيمة عجلة الكرة ؟

وحيث أننا اعتبرنا الاتجاه الرأسي إلى أعلى موجبًا ، فهذا ينطبق أيضًا على كـل الكميات المتجهة كالإزاحة والسرعة والعجلة . وعليه فإن العجلة السالبة تتجه رأسيًا إلى أسفل .

سؤال : ما قيمة هذه العجلة ؟

الإجابة : يمثل الشكل 6–2 بعض قيم الميل ، وبالحساب نجد أن :

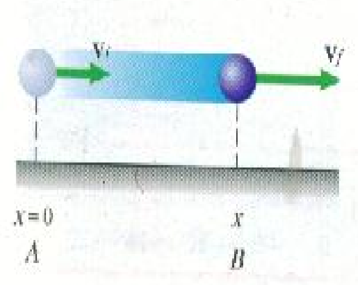
$$a = \frac{\text{الارتفاع}}{\text{زمن الارتفاع}} = \frac{-14\ m/s}{1.4\ s} = -10\ m/s^2$$

أعد الحسابات مرة أخرى مستخدمًا نقطتين أخريين.

الحل والمناقشة : عجلة الكرة خلال الرحلة بأكملها (صعودًا وهبوطًا) تساوى حوالى $10\ m/s^2$ واتجاهها إلى أسفل . فالكرة تتباطئ بمقدار $10\ m/s$ فى الثانية أثناء الصعود وتتسارع بمقدار $10\ m/s$ فى الثانية أثناء الهبوط . وسوف نرى فى القسم 9–2 أن القياسات الدقيقة تبين أن عجلة الكرة $9.8\ m/s^2$. ■

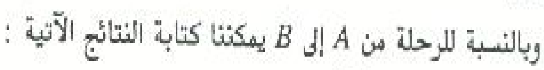
7–2 الحركة الخطية ذات العجلة المنتظمة

عادة ما تكون المواقف التى تتغير فيها العجلة صعبة التناول رياضيًا . لـهذا السبب سنقتصر فى مناقشتنا على الحالات التى تكون فيها العجلة ثابتة كما فـى المثال 1–2 . (ويقال فى مثل هذه الحالات أن الجسم متسـارع بانتظام) . وبـالرغم من أن هـذا قد يكون تبسيطًا مفرطًا فإن كثيرًا من الأنظمة الفيزيائية تقترب من هذه الحالـة . فالأجسام الساقطة سقوطًا حرًا بالقرب من سطح الأرض تحت تأثير الجاذبية مثلاً تتحـرك بعجلة منتظمة . وسوف نرى الآن كيف نصف الحركة الخطية للأجسام عندما تكون عجلتها منتظمة (ثابتة) .



شكل 7–2 : تستغرق الكرة زمنا قدره t للوصول من A إلى B .

حيث أن الحركة فى خط مستقيم ، يمكننا تبسيط المناقشة باستعمال الإشـارتين الموجبة والسالبة لتحديد الاتجاه . علاوة على ذلك فإننـا سنمثل الإزاحـة المتجهـة بـالحرف **x** والسرعة فى اتجاه x بالحرف **v** والعجلـة فـى اتجـاه x بـالحرف **a** . فالجسـم الموضح بالشكل 7–2 مثلاً يتحرك بعجلة ثابتة فى الاتجاه x ، وتكون سرعته $\mathbf{v}_0$ عند مروره بالنقطة A و $\mathbf{v}_f$ فى لحظة تالية t عند مروره بالنقطة B . أى أن **x** تمثل الإزاحة من A إلى B .



وبالنسبة للرحلة من A إلى B يمكننا كتابة النتائج الآتية :

1 ـ السرعة المتوسطة $\bar{\mathbf{v}}$ أثناء الرحلة :

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\text{الإزاحة}}{\text{الزمن}} = \frac{\mathbf{x}}{t}$$

ومنه

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{v}}\,t \qquad (2\text{–}5)$$

المعادلة (2-5) تحتوى على متجه واحد فقط على كل من جانبى إشارة التساوى ولـهذا يمكن كتابة هذه المعادلة بدون الرموز الاتجاهية لأن اتجاه كل من $\mathbf{x}$ و $\overline{\mathbf{v}}$ (وبالتالى إشارتيهما) واحدة دائمًا :

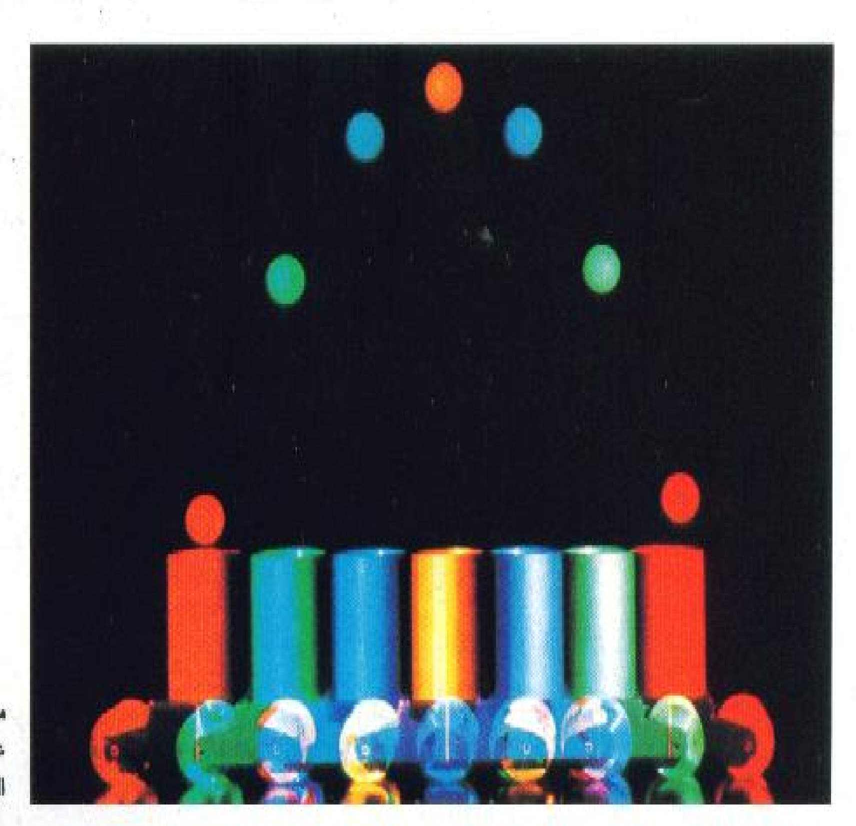
$$\bar{v} = x/t \tag{2-5}$$

2 ـ العجلة المتوسطة والعجلة اللحظيـة متسـاويتان لأن العجلـة منتظمـة ، ولـذا يتحـول تعريف العجلة إلى :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t} \quad \mathbf{v}_f = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t \tag{2-6}$$

3 ـ حيث أن الجسم يتسارع بانتظام فإن سرعته تتغير خطيًا مع الزمـن مـن $\mathbf{v}_0$ إلى $\mathbf{v}_f$. ولذلك فإن السرعة المتوسطة بين A و B هى ببساطة متوسط هاتين القيمتين :

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{v}_f + \mathbf{v}_0}{2} \tag{2-7}$$



مسار المقذوف يكون على شكل قطع مكـافئ عند ثبوت عجلة الجاذبية وإهمـال مقاومـة الهواء .

لدينا الآن ثلاث معادلات تنطبق على الحركة ذات العجلـة المنتظمـة هـى المعـادلات (2-5) ، (2-6) ، (2-7) وهى كافية لوصف الحركة فى أى موقف عادى تكون العجلة فيه منتظمة .

بدأت الآن ثروتنا من المفاهيم والتعريفات المفيدة فى الزيادة والاتسـاع ، مفيـدة لأنـها مفتاح الحل لإزالة شكوى كثير من الطلاب وهى : « تقابلنى دائمًا مشكلة فـى تحويل المسألة اللفظية إلى صورة معادلة رياضية . كيـف أعلم أى المعادلات اسـتخدم ؟ » إن الجـزء

الأكبر من الصعوبة يتمثل فى ترجمة ألفاظ المسألة أولاً إلى مفاهيم فيزيائية مضبوطة ثم إلى الرموز المناظرة المستخدمة فى المعادلات . إليك دليل موجز لساعدتك فى ترجمة المسائل المتعلقة بالحركة :

السؤال أو العبارة	الترجمة
متى ؟	ما قيمة t ؟
أين ؟	ما قيمة الموضع ؟ (x أو y أو s مثلاً)
تبدأ من السكون	$v_0 = 0$
بأى سرعة ؟	ما قيمة v ؟
ما الزمن المستغرق ؟	ما قيمة Δt ؟
ما المسافة المقطوعة ؟	ما قيمة $x_f - x_0$ ؟ (أو $y_f - y_0$ أو $s_f - s_0$ ، .. . إلخ
يصل إلى السكون .	$v_f = 0$

مثال 2-2 :

افترض أن سيارة تبدأ من السكون وتتسارع بانتظام إلى 0.5 m/s خلال 10 s أثناء حركتها على استقامة المحور x . أوجد العجلة والمسافة المقطوعة خلال هذا الزمن .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى البيانات المعطاة فى المسألة عند وضعها فى صورة رموز طبقاً لقائمة المعادلات المستخدمة فى الدليل السابق ؟

الإجابة :

1 ـ « تبدأ من السكون » تعنى $v_0 = 0$.

2 ـ « تتسارع بانتظام » أى أن المعادلات (2-5) ؛ (2-6) ، (2-7) تنطبق على هذا الموقف .

3 ـ « إلى 0.5 m/s خلال 10 s » تعنى أن $v_f = 0.5$ m/s عند $t = 10$ s .

4 ـ « أثناء حركتها على استقامة المحور x » تعنى أن هذه حركة فى بعد واحد ولهذا فإن x تصف موضع السيارة .

سؤال : ما الكميات المطلوب تعيينها ؟

الإجابة : قيمة العجلة **a** والمسافة التى تقطعها السيارة x .

سؤال : أى المعادلات استخدم ؟

الإجابة : المعادلات التى تحتوى على الكميات المعلومة (v_0 ، v_f ، t) والكميات المجهولة (**a** ، **x**) . المعادلة المناسبة هى المعادلة (2-6) :

$$a = (v_f - v_0)/t$$

وحيث أن معادلة x (المعادلة 5-2) تتضمن السرعة المتوسطة ، من الضروري إيجاد هذه الكمية قبل استخدام المعادلة . تعطى السرعة المتوسطة بالمعادلة (7-2) :

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_f - v_0)$$

الحل والمناقشة : العجلة هي :

$$a = \frac{5.0\ m/s - 0\ m/s}{10\ s} = 0.50\ m/s^2$$

والسرعة المتوسطة هي :

$$\bar{v} = \frac{1}{2}(0\ m/s + 5.0\ m/s) = 2.5\ m/s$$

ومن ثم فإن المسافة التي تقطعها السيارة خلال 10 s تكون :

$$x = (2.5\ m/s)(10\ s) = 25\ m$$

وتكون عجلة السيارة أثناء هذه الفترة الزمنية $0.50\ m/s^2$. لاحظ مرة ثانية كيف تعامل الوحدات كرموز جبرية أثناء الحسابات .

مثال 3-2 :

افترض أن سيارة تتحرك بمعدل قدره 5.00 m/s قد وصلت إلى السكون خلال مسافة قدرها 20.0 m . أوجد عجلة الحركة وزمن توقف السيارة . اعتبر أن الحركة على استقامة المحور x وأن عجلتها ثابتة .

استدلال منطقي :

1

سؤال : ما المعلومات المعطاة ؟ وما معنى نص المسألة ؟

الإجابة :

1 ـ « تتحرك بمعدل قدره 5.0 m/s » تعني أن $v_0 = 5.00\ m/s$.

2 ـ « وصلت إلى السكون » تعني أن $v_f = 0\ m/s$.

3 ـ « خلال مسافة قدرها 20.00 m » تعني أن تغير السرعة (عند ثبوت العجلة) يحدث خلال مسافة قدرها 20.00 m .

سؤال : ما المطلوب إيجاده ؟

الإجابة : العجلة **a** والزمن t الذي تتوقف خلاله السيارة .

سؤال : كيف يمكن إيجاد t وليست لدي صيغة رياضية له ؟

الإجابة : ليس لدينا صيغة رياضية لأي شيء ، بل لدينا علاقات بين مختلف الكميات المستخدمة لوصف الحركة ، وبعض هذه العلاقات تتضمن t .

سؤال : إذا استخدمنا المعادلة (6-2) لحساب **a** فهل سنحتاج إلى معرفة قيمة t ؟ ما هى المعادلات الأخرى التى تحتوى على t ؟

الإجابة : المعادلة (5-2) ، أى $x = \bar{v}t$ ، التى يمكن وضعها على الصورة $t = x/\bar{v}$.

سؤال : كيف يمكن تعيين $\bar{\mathbf{v}}$ من المعطيات ؟

الإجابة : من العلاقة التى تصفها المعادلة (7-2) : $\bar{\mathbf{v}} = \frac{1}{2}(\mathbf{v}_f + \mathbf{v}_0)$.

الحل والمناقشة : باستخدام المعادلة (7-2) سنجد أن $\bar{\mathbf{v}} = 2.50 \text{ m/s}$. إذن ، الزمن الذى تستغرقه السيارة لكى تتوقف تمامًا هو :

$$t = \frac{x}{\bar{v}} = \frac{20.0 \text{ m}}{2.50 \text{ m/s}} = 8.00 \text{ s}$$

وبمعلومية t يمكن حساب العجلة من المعادلة (6-2) :

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t} = \frac{0 \text{ m/s} - 500 \text{ m/s}}{80.0 \text{ s}}$$
$$= -0.625 \text{ m/s}^2$$

الإشارة السالبة تبين أن اتجاه **a** عكس اتجاه **v** ، ومن ثم فإنها تصف تباطؤ السيارة .

لندرس الآن مثالاً يتطلب بعض المناورات مع المعادلات . هذا المثال يبين لنا مدى أهمية استخدام قواعد الجبر استخدامًا سليمًا .

مثال 4-2 :

تبدأ سيارة حركتها من السكون وتتسارع بمعدل قدره 4.00 m/s خلال مسافة قدرها 20.00 m . (أ) ما هى سرعة السيارة حينئذ ؟ (ب) ما الزمن اللازم لقطع المسافة 20.00 m ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما معطيات المسألة وما المطلوب إيجاده ؟

الإجابة : المعطيات هى $\mathbf{v}_0 = 0$ ، $\mathbf{a} = 4.00 \text{ m/s}^2$ و $\mathbf{x} = 20.00 \text{ m}$. والمطلوب إيجاد $\mathbf{v}_f$ عندما تكون السيارة قد قطعت مسافة 20.00 m والزمن اللازم لذلك .

سؤال : ما العلاقات التى يجب استخدامها ؟

الإجابة : مرة ثانية ، المعادلات (5-2) ، (6-2) ، (7-2) تنطبق على هذه الحالة ، وكل من هذه المعادلات يحتوى على مجهولين فى هذه المسألة . وعليه فإن أيًا منها لا يمكن استخدامه مباشرة . علينا إذن حل هذه المعادلات الثلاث آنيًا وعندئذ سنحصل على معادلتين إضافيتين نافعتين للغاية . وهنا سنتوقف عن متابعة هذا المثال حتى نقوم باستنتاج هاتين المعادلتين بطريقة عامة .

2-8 معادلتان مشتقتان للحركة ذات العجلة المنتظمة

يمكن حل المثال 4-2 بسهولة إذا حصلنا على معادلتين أخريين لاستخدامهما بالإضافة إلى المعادلات (5-2) ، (6-2) ، (7-2) . ولاستنتاج المعادلتين الجديدتين تحل المعادلات المعلومة آنيًا . فإذا ما تحقق ذلك لن نضطر إلى تكرار العملية ، وما علينا ببساطة إلا أن نضيفهما إلى قائمة المعادلات السابقة واستخدامها فى حل المسائل المستقبلية .

وبالتعويض عن قيمة **v** من المعادلة (7-2) فى (5-2) نحصل على :

$$\mathbf{x} = \frac{1}{2}(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0) \qquad (2\text{–}8)$$

وبالتعويض عن قيمة t من المعادلة (6-2) نجد أن :

$$\mathbf{x} = \left(\frac{\mathbf{v}_f + \mathbf{v}_0}{\mathbf{a}}\right)\left(\frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{2}\right) \quad \text{أو} \quad (\mathbf{v}_f)^2 - (\mathbf{v}_0)^2 = 2\mathbf{ax}$$

تواجهنا هنا حالة ضرب متجهين ، وهو ما لم يناقش سابقًا ، ولكن يمكن حل هذه المشكلة بسهولة فى حالة الحركة فى بُعد واحد . فكل متجه يمكن فقط أن يكون موجب القيمة أو سالب القيمة . كذلك فإن حاصل ضرب متجه فى نفسه يساوى مربع مقداره : $(\mathbf{v}_f)^2 = v_f^2$ و $(\mathbf{v}_0)^2 = v_0^2$. علاوة على ذلك فإن حاصل ضرب **a** فى x فى بعد واحد يساوى $+ax$ أو $-ax$ ، ويتوقف ذلك على ما إذا كانت إشارتى **a** و **x** متماثلتين أو مختلفتين . وعليه يمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة مقادير المتجهات فى الصورة :

$$v_f^2 = v_0^2 + 2ax \qquad (2\text{–}9)\ \text{أ}$$

عندما يكون المتجهان **a** و **x** متماثلى الإشارة ، أو

$$v_f^2 = v_0^2 - 2ax \qquad (2\text{–}9)\ \text{ب}$$

عندما يكون المتجهان **a** و **x** مختلفى الإشارة .

أما المعادلة الثانية فيمكن اشتقاقها باستخدام المعادلة (8-2) بطريقة أخرى . فبالتعويض عن $\mathbf{v}_f$ من المعادلة (6-2) فى المعادلة (8-2) نحصل على :

$$\mathbf{x} = \frac{1}{2}\mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2}(\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t)t$$

التى يمكن تبسيطها إلى الصورة :

$$\mathbf{x} = \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2 \qquad (2\text{–}10)$$

لدينا الآن خمس معادلات تستخدم فى حل مسائل الحركة ذات العجلة المنتظمة هى :

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{v}}\, t \qquad (\text{2-11أ})$$

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{v}_f + \mathbf{v}_0}{2} \qquad (\text{2-11ب})$$

$$\mathbf{v}_f = \mathbf{v}_0 - \mathbf{a}t \qquad (\text{2-11جـ})$$

$$v_f^2 = v_0^2 + 2ax \qquad (\text{2-11د})$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2 \qquad (\text{2-11هـ})$$

مثال 2-4 (تكملة)

سؤال : ما هى المعادلات التى تنطبق على هذه المسألة ؟

الإجابة : حيث أن a ، v_0 ، x معلومة ، فإن المعادلة (11-2 د) ، أى $v_f^2 = v_0^2 + 2ax$ ، تعطى $\mathbf{v}_f$ مباشرة . وبمعلومية $\mathbf{v}_f$ يمكن إيجاد t من المعادلتين (11-2 أ) ، (11-2ب) .

سؤال : هل توجد طريقة أكثر مباشرة وسهولة لإيجاد t ؟

الإجابة : نعم ، إذ أن ميزة استنتاج المعادلتين الإضافيتين فى الصورة العامة هى أننا نستطيع استخدامهما مباشرة . ذلك أن المعادلتين (11-2 جـ) ، (11-2 د) تحتويان على مجهول واحد هو t ويمكن تطبيقهما فى هذه المسألة . ونظرًا لأن المعادلة (11-2 جـ) معادلة خطية ، بينما المعادلة (11-2 هـ) معادلة تربيعية ، فإن من الأسهل استخدام المعادلة (11-2 جـ) لإيجاد t : $t = (v_f - v_0)/a$.

الحل والمناقشة :

(أ) $v_f^2 = v_0^2 + 2ax = 0 + 2(4.00\ \text{m/s}^2)(20.0\ \text{m}) = 160\ \text{m}^2/\text{s}^2$

إذن $v_f = \pm\sqrt{160\ \text{m}^2/\text{s}^2} = \pm 12.6\ \text{m/s}$ ، وذلك لأن المعادلة التربيعية لها حلان دائمًا . ولكننا افترضنا أن الحركة فى الاتجاه الموجب للمحور x ، إذن الحل الصحيح هو $+12.6$ m/s . (الحل -12.6 m/s يكون صحيحًا إذا كانت **a** سالبة وكانت السيارة متحركة بمعدل 12.6 m/s فى الاتجاه السالب للمحور x) .

(ب) $$t = \frac{v_f - v_0}{a} = \frac{12.6\ \text{m/s} - 0}{4.00\ \text{m/s}^2} = 3.15\ \text{s}$$

مثال 2-5 :

تبدأ سيارة متحركة بمعدل قدره 60 km/h فى التباطؤ بتقاطر قدره $1.50\ \text{m/s}^2$. ما الزمن اللازم لكى تقطع السيارة 70.0 m أثناء التباطؤ ؟

استدلال منطقى :

سؤال : الكمية الوحيدة المطلوب إيجادها هى الزمن t . ما المعلومات المعطاة ؟

الإجابة : السرعة الابتدائية $v_0 = 60.0$ km/h والتقاصر ويساوى 1.50 m/s² والمسافة $x = 70.0$ m .

سؤال : ما معنى المصطلح « تقاصر » ؟

الإجابة : معناه عجلة سالبة ، أى عجلة اتجاهها عكس اتجاه السرعة . فإذا اعتبرنا السرعة 60.0 km/h يجب أن تكون العجلة $a = -1.50$ m/s² .

سؤال : وحدات السرعة مختلفة عن وحدات a و x . ماذا يجب عمله لإزالة هذا التناقص ؟

الإجابة : يجب تحويل الكمية 60.0 km/h إلى m/s .

$$60 \text{ km/h} = (60.0 \text{ km/h})(1000 \text{ m}/1 \text{ km})(1 \text{ h}/2600 \text{ s})$$
$$= 16.7 \text{ m/s}$$

يجب عليك أن تتأكد دائمًا أن جميع الكميات لـها نفس الوحدات قبل إجراء أى عملية حسابية . (سبق تناول موضوع تحويل الوحدات فى الفصل الأول) .

سؤال : أى معادلة تنطبق على هذه المسالة ؟

الإجابة : إحدى المعادلات التى تحتوى على t . المعادلتان (11-2 أ) ، (11-2 جـ) يتطلب استخدامها معرفة v_f ، ولكن المعادلة (11-2 هـ) هى الوحيدة التى تحتوى على مجهول واحد هو t ، ولكنها معادلة تربيعية وحلها أكثر إرهاقًا من المعادلة الخطية .

سؤال : هل هناك طريقة لإيجاد v_f ؟

الإجابة : نعم يمكن حساب v_f من المعادلة (11-2 د) : $v_f^2 = v_0^2 + 2ax$

الحل والمناقشة :

1 ـ باستخدام المعادلة (11-2 د) نحصل على :

$$v_f^2 = v_0^2 + 2ax = (16.7 \text{ m/s})^2 + 2(-1.50 \text{ m/s}^2)(70.0 \text{ m})$$
$$= 279 \text{ m}^2/\text{s}^2 - 210 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 69.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$$
$$v_f = \pm 8.30 \text{ s}$$

وسوف نختار القيمة $v_f = +8.30$ s بفرض أن الحركة إلى اليمين .

2 ـ المعادلة (11-2 جـ) تعطى :

$$t = \frac{v_f - v_0}{a} = \frac{+8.30 \text{ m/s} - +16.7 \text{ m/s}}{-1.50 \text{ m/s}^2}$$
$$= \frac{-8.4 \text{ m/s}}{-1.50 \text{ m/s}^2} = +5.40 \text{ s}$$

لاحظ استخدام العجلة a بالإشارة الجبرية الصحيحة ، وبذلك تنتج كل من t و v_f بالإشارة الصحيحة .

خلافات فى الفيزياء : نظريات السقوط الحر

تمثل دراسة سلوك الأجسام الساقطة مثالاً بينًا للفرق بين العمل الجيد والعلم الهزيل ، ولهذا الموضوع تاريخ طويل مثير نبدأه من عصر الفيلسوف الشهير أرسطو (384 – 322 قبل الميلاد) .

كان المعتقد فى عصر أرسطو أن الجسم الخفيف يسقط فى الهواء بسرعة أقل من الجسم الثقيل . وبناء على ذلك وضع أرسطو نظرية للأجسام الساقطة على أساس أن جميع الأجسام تتكون من أربعة عناصر هى التراب والهواء والنار والماء . فالأجسام المكونة من التراب والماء أساسًا تحاول أن تصل إلى مكان استقرارها الطبيعى وهو الأرض ؛ ولذا فإنها تسقط على الأرض إذا ما وجدت الفرصة لذلك . أما الأجسام المكونة من الهواء فتحاول الارتفاع إلى موضع استقرارها الطبيعى وهو السماء . وفى رأى أرسطو أن الحجر يسقط بسرعة لأنه مكون من التراب أساسًا ويهفو إلى مكان استقراره الطبيعى . أما الريش المكون أساسًا من الهواء فإنه يبحث عن الأرض بشغف أقل ؛ ولذلك فإنه يسقط بسرعة أقل من الحجر . وقد أستنتج أرسطو علاوة على ذلك أن سرعة سقوط الجسم ثابتة . وإذا ما أسقطت أنت الريشة (أو قطعة من منديل الوجه الورقى) سترى كيف توصل أرسطو إلى هذا الاستنتاج . ومع ذلك فقد كان تزايد سرعة الحجر تزايدًا مطردًا أثناء السقوط حقيقة محيرة لأرسطو لأنه لم يكن بإمكانه قياس زمن هبوط مثل هذه الأجسام الساقطة بسرعة عالية . ونظرًا لأن أرسطو كان فيلسوفًا يتمتع باحترام معاصريه وتقديرهم العالى لمنزلته لم يجرؤ سوى القليل من الناس أن يشكوا فى نظريته واستنتاجه . ولهذا السبب لم يتحقق سوى القليل من التقدم فى فهم سلوك الأجسام الساقطة حتى عصر جاليليو بعد حوالى 2000 عامًا .

وبحلول عام 1250 بدأ العلم كما نعرفه الآن فى الظهور . وقد كان روجر بيكون (1214 – 1294) من أوائل من أعتنقوا فكرة أن الخبرة (أى التجربة) ضرورية فى تطوير النظريات عن السلوك الطبيعى . ولكن يبدو أنه هو نفسه لم يكن مدركًا لأهمية التحكم فى المتغيرات المؤثرة على نتيجة التجربة . وبعد فترة طويلة حوالى عام 1605 ، أكد فرانسيس بيكون (1561 – 1626) فى رسالته « تقدم التعليم » أن النظريات يجب أن تبنى على أساس حقائق مسجلة عمليًا .

وقد كان جاليليو (1564 – 1642) أخيرًا أول من مهد الطريق لتطوير العلم الحقيقى بإجراء العديد من التجارب العملية فى الفلك والبصريات والميكانيكا ، وكان أهم ملامح عمله إدراكه أن التجارب التى لها معنى هى تلك التجارب المحكمة ، بمعنى ضرورة تغيير متغير واحد فقط فى التجربة . ومن ثم أدرك جاليليو أن مقارنة طريقتى سقوط الريشة والحجر هى طريقة غير قابلة للتفسير تقريبًا لأن هناك فروقًا كثيرة جدًا بين الجسمين . ولهذا قام جاليليو بتصميم بعض التجارب العبقرية لقياس زمن سقوط أجسام متماثلة ذات كتلة مختلفة بدقة كبيرة ، وتوصل إلى أن وزن الجسم لا يؤثر على عجلة حركته بشرط إهمال تأثير احتكاكها مع الهواء . بالإضافة إلى ذلك وجد جاليليو أن الأجسام لا تسقط سقوطًا حرًا بسرعة ثابتة ، كما كان يعتقد أرسطو ، ولكنها تتحرك بعجلة منتظمة .

وبمرور الأعوام اكتسبت طرق العلم تهذيبًا مطردًا ، ولكن ما زالت التجربة بمثابة القلب من العلم الجيد . ذلك أنه بدون التجارب المحكمة التى تمدنا بنتائج غير غامضة لن يكون بإمكاننا إلا أن نلجأ إلى التخمين فيما يتعلق بسلوك العالم المحيط بها . وكى تكون النظريات ذات قيمة لابد أن تكون مبنية على أساس الحقائق العلمية .

وقبل الانتقال إلى موضوع آخر عليك أن تقوم بحل هذه المسألة باستعمال المعادلة (2-11 هـ) لتطمئن على قدرتك على حل المعادلات التربيعية لأننا كثيرًا ما نقابلها فى مختلف فروع الفيزياء . راجع طريقة حل المعادلة التربيعية فى الملحق 3 . ثم استعن بهذه التلميحات :

1 ـ باستخدام معطيات المسألة نجد من المعادلة (2-11 هـ) أن

$$70.0 = 16.7t + \frac{1}{2}(-1.50)t^2 = 16.7t - 0.750t^2$$

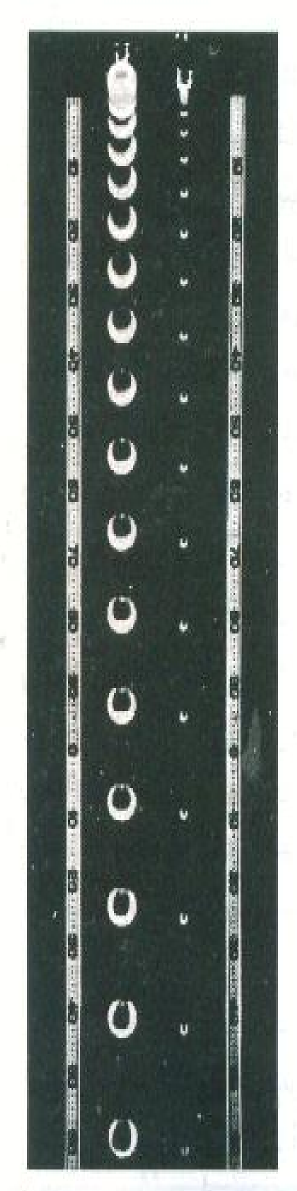
حيث أسقطنا الوحدات مؤقتًا لتستطيع رؤية شكل المعادلة بصورة أكثر سهولة .

2 ـ الصورة العامة للمعادلة التربيعية هى $at^2 + bt + c = 0$ ، وبالتالى تكون معادلتنا على الصورة $-0.750t^2 + 16.7t - 7.00 = 0$ ، ومنه نجد أن المعاملات العامة فى حالتنا هى :

$$a = -0.750 \qquad b = +16.7 \qquad c = -70.0$$

إثبت أن المعادلة التربيعية تعطى $t = 5.6$ s و $t = 16.7$ s . لماذا يجب نبذ الحل الأخير ؟

2-9 السقوط الحر للأجسام



شكل 2-8 :
يمكن تصوير الأجسام الساقطة على فترات زمنية متساوية باستخدام الضوء الوميضى . وبالرغم من أن الجسمين مختلفان فى الحجم والوزن فإنهما يتفقان فى طريقة السقوط (مركز تطوير التعليم) .

لندرس التجربة المبينة بالشكل 2-8 والتى تمثل جسمين ساقطين سقوطًا حرًا تحت تأثير الجاذبية الأرضية . وقد التقطت صور الجسم على فترات زمنية متساوية باستخدام الضوء الوميضى . لاحظ أن الجسمين يتحركان بنفس العجلة بالرغم من اختلاف حجميهما وكتلتيهما ، وهذا ما أكده جاليليو (1564 – 1642) . وتبين القياسات أن الجسم الساقط **سقوطًا حرًا** ، بالقرب من سطح الأرض يتسارع رأسيًا إلى أسفل بعجلة قدرها $9.8\ m/s^2$. يعنى هذا أن معدل حركة الجسم الساقط **سقوطًا حرًا** بعد مرور فترات زمنية متساوية قدرها 1 s اعتبارًا من لحظة إسقاطه تكون كما يأتى : 9.8 m/s ، 19.6 m/s ، 29.4 m/s . . . وهكذا . أى أن السرعة الرأسية إلى أسفل تتزايد بمقدار 9.8 m/s كل ثانية ؛ وبأسلوب آخر يقال أن العجلة تساوى $9.8\ m/s^2$ واتجاهها رأسى إلى أسفل .

وبالرغم من هذا التأكيد فإننا نعلم أن قطعة الرخام أو الريشة أو قطعة من منديل الوجه الورقى تسقط كلها بطرق مختلفة ، والسبب فى ذلك أن سقوط هذه الأجسام ليس **سقوطًا حرًا** . فأثناء سقوط الريشة سوف يسبب احتكاكها مع الهواء إعاقتها عن السقوط ؛ ذلك أن قوة الاحتكاك تتوازن تقريبًا مع شد الجاذبية الأرضية لها ، ومن ثم لن يكون سقوط الريشة حرًا بالتأكيد . وبالمثل فإن قطعة منديل الوجه الورقى تسقط ببطء بسبب تأثيرات الهواء عليها . أما قطعة الرخام فيكون شد الجاذبية الأرضية لها أكبر كثيرًا من احتكاكها بالهواء الذى يعيق حركتها لأن وزنها كبير جدًا بالنسبة لوزن كل من الريشة وقطعة منديل الوجه الورقى . وهكذا يمكننا القول أن قطعة الرخام تسقط سقوطًا حرًا ،

طالما لم يكن معدل حركتها كبيرًا جدًا إلى درجة تؤدى إلى زيادة قوة الاحتكاك مع الهواء إلى قيمة كبيرة جدًا .

من السهولة بمكان تحليل حركة سقوط الأجسام التى لا تقع تحت تأثير أى قوى كبيرة خلاف شد الجاذبية الأرضية . وتبين التجربة أن الأجسام تسقط (تجاه الأرض) بعجلة رأسية إلى أسفل مقدارها $9.80\ m/s^2$ تسمى **عجلة الجاذبية الأرضية** ويرمز لها بالحرف g . هذا وتختلف قيمة g اختلافًا طفيفًا من مكان إلى آخر على الأرض كما هو موضح بالجدول 1-2 .

لنعد مرة ثانية للشكل 5-2 الذى يوضح حركة كرة تحت تأثير الجاذبية فقط ، وقد سبق تحليل هذه الحركة فى المثال 1-2 والشكلين 5-2 ب ، 6-2 ، وقد وجد أن عجلة الكرة تساوى $10\ m/s^2$ تقريبًا واتجاهها إلى أسفل سواء كانت الكرة صاعدة أو ساقطة (هابطة) . هذا مثال آخر للحقيقة الأكيدة بأن عجلة الجسم الساقط سقوطًا حرًا ثابتة وتساوى $9.8\ m/s^2$ وأن اتجاهها رأسى إلى أسفل . وسواء كانت الكرة صاعدة أم ساقطة فإن عجلتها تظل g إلى أسفل . ففى حالة الصعود ، كما فى المثال 1-2 ، **تقل** سرعة الكرة بمعدل قدره $9.8\ m/s$ كل ثانية حتى تصل إلى أعلى نقطة حيث تصبح سرعتها صفرًا . بعدئذ تتزايد سرعة الكرة بمعدل قدره $9.8\ m/s$ كل ثانية أثناء السقوط .

جدول 1-2 :
عجلة الجاذبية الأرضية g

المكان	$g\ (m/s)^2$
بوفورد ، إن . سى	9.7973
نيوأورليانز	9.7932
جلافستون	9.7927
سياتل	9.8073
سان فرانسيسكو	9.7997
سان لويس	9.8000
كليفلاند	9.8024
دنفر	9.7961
بايكس بيك	9.7895

سوف نقوم الآن بتحليل حركة السقوط الحر للأجسام فى عدة أمثلة ، ولكن قبل ذلك عليك ملاحظة الحقائق الآتية . أولاً ، إذا اخترت الاتجاه إلى أعلى موجبًا فإن عجلة الجاذبية تكون $-9.8\ m/s^2$ لأن اتجاهها إلى أسفل ومن المهم دائمًا مراعاة صحة الإشارة الجبرية لكل من الإزاحة والسرعة والعجلة لأنها تدلنا على اتجاه هذه الكميات . ثانيًا ، حيث أن العجلة ثابتة ($9.8\ m/s^2$ رأسيًا إلى أسفل) فإن الحركة تحت تأثير الجاذبية الأرضية تكون حركة ذات عجلة منتظمة تنطبق عليها معادلاتنا الخمس للحركة ، ولكننا سنستعمل y بدلاً من x فى هذه المعادلات لتوضيح الطبيعة الرأسية للحركة .

ويجب عليك توخى الحرص الشديد فى التطبيقات المتعلقة بالحركة إلى أعلى وإلى أسفل ، ومن الضرورى أن تقرر من البداية أى اتجاه سوف تعتبره موجبًا . هذا الاختيار عفوى تمامًا ، ولكن بمجرد أن تختار اتجاهك الموجب فى مسألة معينة يجب عليك أن تلتزم بهذا فى المسألة كلها .

مثال 6-2 :

أسقطت حجرًا من فوق الكوبرى . فإذا استغرق الحجر زمنًا قدره $3.0\ s$ ليصل إلى سطح الماء ، فما ارتفاع يدك بالنسبة لسطح الماء فى لحظة إسقاطك الحجر ، بفرض أن الاحتكاك مهمل ؟ (لاحظ أن المسألة تنتهى فى اللحظة التى تسبق اصطدام الحجر بالماء لأن الحجر يسقط سقوطًا حرًا خلال هذه الفترة فقط) .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى الكميات المعلومة ؟

الإجابة : الزمن اللازم لسقوط الحجر والسرعة الابتدائية وتساوى صفرًا وأن السقوط حر وهذا يعنى أن العجلة تساوى $9.8\ m/s^2$ رأسيًا إلى أسفل .

سؤال : ما المطلوب إيجاده ؟

الإجابة : المسافة التى قطعها الحجر رأسيًا خلال الزمن المعطى وقدره $3.0\ s$ ، ويمكنك أن تسمى هذه المسافة y .

سؤال : الحركة رأسية إلى أسفل . هل نعتبر هذا الاتجاه موجبًا أم سالبًا ؟

الإجابة : كما تريد ، ولكن بمجرد اختيار اصطلاح الإشارات عليك أن تلتزم باستعماله مع كل المتجهات خلال المسألة كلها . فمثلاً :

إذا اخترت **الاتجاه إلى أعلى موجبًا** فعليك وضع $\mathbf{a} = -9.8\ m/s^2$ ، وتوقع عندئذ أن قيمة y التى ستحصل عليها لابد أن تكون سالبة لأن إزاحة الحجر الآن سالبة (إلى أسفل) .

وإذا اعتبرت **الاتجاه إلى أسفل موجبًا** يجب وضع $\mathbf{a} = +9.8\ m/s^2$ وعندئذ ستكون y موجبة .

سؤال : أى معادلة من معادلات الحركة تناسب هذه المسألة ؟

الإجابة : المعادلة (2-11 هـ) هى التى تربط بين الموضع والزمن مباشرة وبالرغم من أن x ترمز لموضع فى هذه المعادلة ، يمكن استخدام أى رمز آخر مثل y ليمثل الموضع إذا رأيت ذلك . وعندئذ يمكن كتابة المعادلة (2-11 هـ) على الصورة :

$$y = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

الحل والمناقشة : بالتعويض عن الكميات المعلومة من معطيات المسألة وبفرض أن الاتجاه الموجب رأسى إلى أسفل نجد أن :

$$y = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = (0)(3.0\ s) + \frac{1}{2}(+9.8\ m/s^2)(3.0\ s)^2 = 44\ m$$

تمرين : ما سرعة الحجر فى اللحظة السابقة لاصطدامه بالماء مباشرة ؟

الإجابة : $29\ m/s$.



شكل 2-9 :
تقذف الكرة من النقطة A رأسيًا إلى أعلى بمعدل حركة قدره $15\ m/s$. وحيث أن الكرة تتوقف لحظيًا عند النقطة B فإن سرعتها فى هذه اللحظة صفرًا .

مثال 2-7 :

قذف شخص كرة رأسيًا إلى أعلى بمعدل حركة ابتدائى قدره $15.0\ m/s$ فارتفعت ثم سقطت ليلتقفها ذلك الشخص مرة أخرى ، ويمثل الشكل 2-9 مسار الكرة . (أ) إلى أى ارتفاع تصل الكرة ؟ (ب) ما سرعتها فى اللحظة السابقة لإمساكها ؟ (جـ) ما الزمن الذى تقضيه الكرة فى الهواء ؟

استدلال منطقى : الجزء (أ)

سؤال : ما نوع هذه الحركة ؟

الإجابة : حركة سقوط حر ، ولكن الشروط الابتدائية مختلفة هنا .

سؤال : أى الكميات معلوم ؟

الإجابة : $\mathbf{v}_0 = +15.0\ m/s$ إذا اختير الاتجاه إلى أعلى موجبًا . وحيث أن السقوط حر فإن $\mathbf{a} = -9.80\ m/s^2$.

سؤال : كيف تفهم السؤال أ ؟ ما هو الشرط الفيزيائى لتعريف أعلى نقطة فى مسار طيران الكرة ؟

الإجابة : عند النقطة B فى الشكل 9-2 تسكن الكرة لحظة قصيرة جدًا (مهملة) . إذن تخضع أعلى نقطة للشرط $\mathbf{v} = 0$. وإذا ما ركزنا الاهتمام على الجزء من A إلى B فى مسار الطيران يمكننا اعتبار أن السرعة عند B هى السرعة النهائية ، أى أن $\mathbf{v}_f = 0$.

سؤال : ماذا يمكن أن نوجده عندما تكون $\mathbf{v}_f = 0$ ؟

الإجابة : قيمة الموضع الرأسى y . ومن المناسب اختيار $y = 0$ عند نقطة البداية A .

سؤال : ما هى المعادلة التى تربط المسافة y بالكميات المعلومة ؟

الإجابة : حيث أن مقادير كل من $\mathbf{v}_0$ ، $\mathbf{v}_f$ ، a معلومة ، يمكننا استخدام المعادلة (2-11 د) : $v_f^2 = v_0^2 + 2ay$ ، حيث y تمثل المسافة بدلاً من x .

الحل والمناقشة : بحل المعادلة (2-11 د) بالنسبة إلى y والتعويض عن الكميات المعلومة بالأعداد المعطاة :

$$y = \frac{v_f^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0\ m^2/s^2 - (15.0\ m/s)^2}{2(-9.8 m/s^2)} = +11.5\ m$$

يجب أن تكون قادرًا على التحقق من أن جميع الإشارات متفقة مع اختيار الاتجاه الرأسى إلى أعلى كاتجاه موجب .

استدلال منطقى : الجزء (ب)

سؤال : ما معنى عبارة « عند اللحظة السابقة لإمساكها » ؟

الإجابة : معنى ذلك أن الكرة على نفس الارتفاع الذى قذفت منه ، أى أن الكرة تكون قد عادت إلى الارتفاع الابتدائى ($y = 0$) عند اللحظة t قبل إمساك الكرة مباشرة .

سؤال : هل يمكن استخدام نفس الشروط الابتدائية بالجزء (أ) فى هذا الجزء أيضًا ؟

الإجابة : نعم ، لأن الجزء (ب) مجرد استمرار لنفس الحركة . وعليه فإن

$$\mathbf{v}_0 = +15.0\ m/s, \quad \mathbf{a} = -9.8\ m/s^2, \quad و \quad y_0 = 0$$

سؤال : ما العلاقة بين y و $\mathbf{v}_f$ ؟

الإجابة : $v_f^2 = v_0^2 + 2ay$ مرة ثانية .

سؤال : تحت أى شروط يراد حل المسألة ؟

الإجابة : يراد الحل هذه المرة بالنسبة إلى $\mathbf{v}_f$ عندما تكون $y = 0$.

الحل والمناقشة : بوضع $y = 0$ نجد أن $v_f^2 = v_0^2 = (15.0\ m/s)^2$. وقد تبدو هذه المعادلة بسيطة ، ولكن تذكر أن المعادلة التربيعية لها حلان تفسيرهما متروك لك . هذان الحلان هما :

$$v_f = +15\ m/s \quad و \quad v_f = -15\ m/s$$

القيمة $-15\ m/s$ تمثل السرعة إلى أسفل ، ولذا فإنها الحل الصحيح للجزء (ب) .

وهناك طريقة أخرى للوصول إلى هذا الحل وذلك بأن تعتبر النقطة B كنقطة بداية لكرة أسقطت من السكون من ارتفاع قدره $11.5\ m$ ، وتصبح المسألة عندئذ شبيهة بالمثال 2-6 .

استدلال منطقي : الجزء (ج)

سؤال : ما المعادلة التي تربط t بالمعطيات ؟

الإجابة : $\mathbf{y} = \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2}\mathbf{a} t^2$

سؤال : تحت أي شروط يراد حل هذه المسألة ؟

الإجابة : يراد إيجاد t عند $y = 0$.

الحل والمناقشة : هذه المعادلة تصبح :

$$0 = (15.0\ m/s)t - \frac{1}{2}(-9.8\ m/s^2)t^2$$

وعليك إثبات أن حلي المعادلة هما :

$$t = 0 \quad و \quad t = \frac{15.0}{4.90} = 3.06\ s$$

أي أن هناك لحظتين تكون فيهما $y = 0$: عند لحظة قذف الكرة $(t = 0)$ وعند إمساكها $(t = 3.0\ s)$.

مثال 2-8 :

قذفت كرة رأسيًا إلى أعلى كما بالشكل 2-9 ثم التقفها قاذفها بعد $5.0\ s$ من لحظة القذف . بأي سرعة تحركت الكرة عندما تركت يد هذا الشخص ؟

استدلال منطقي :

سؤال : من الواضح أن هذه حالة أخرى من حركة السقوط الحر العجلة فيها $a = 9.8\ m/s$. ما هي الشروط المحددة في هذه المسألة ؟

الإجابة : زمن الطيران $t = 5.0\ s$ ، والموضع النهائي هو نفس الموضع الابتدائي (أي $y_0 = 0$ ، $y_f = 0$) .

سؤال : المطلوب هو إيجاد السرعة النهائية v_f . أى المعادلات يربط v_0 بالكميات a ، t ، y ؟

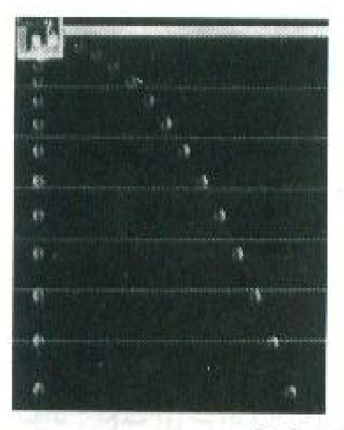
الإجابة : المعادلة (2–11 هـ) : $y = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$

الحل والمناقشة : بحل المعادلة (2–11 هـ) بالنسبة إلى v_0 نجد أن :

$$v_0\, t = y - \frac{1}{2}a\,t^2 \qquad v_0\,(5.0\ s) = 0 - \frac{1}{2}\,(-9.8\ m/s^2)(5.0\ s)^2$$

ومنه $v_0 = +\,24\ m/s$. تأكد من قدرتك على التعرف على الاتجاه الموجب المختار وأنك تستطيع فهم معنى الإشارة الموجبة فى الإجابة .

2–10 حركة المقذوفات



شكل 2–10 : صورة وميضية لحركة كرتى جولف إحداهما ساقطة من السكون والأخرى منطلقة أفقيـا . الفترة الزمنية بيـن الومضـات (1/30 s) والخطوط الأفقية تبعد عن بعضها البعـض مسافة قدرها 15 cm . (مركـز تطوير التعليم) .

من النادر أن تسير كرة البسيبول أو الرصاصة فى مسار خطى . هذه الأجسام تتحرك فى بعدين وتسمى حركتها **بحركة المقذوفات** . ولإيضاح هذا النـوع من الحركـة سنقوم بفحص الشكل 2–10. نرى فى هذا الشكل أن الكرة 1 تسقط فى خط مستقيم إلى أسفل بعجلة رأسية إلى أسفل قدرها $9.8\ m/s^2$ كما رأينا سابقاً . أما الكرة 2 فقـد قذفت أفقيًا فى نفس اللحظة التى أسقطت فيها الكرة 1 . وقد سجلت حركـة المقذوف (الكـرة 2) والحركة الخطية المستقيمة (الكرة 1) باستخدام الضـوء الوميضى . **لاحـظ أن موضعى الكرتين عند نفس الومضة الضوئية متماثلان دائمًـا ، وهـذا يعنـى أن الكـرة 2 تسـقط رأسيًا بنفس العجلة وقدرها $9.8\ m/s^2$ بالرغم من أنها تتحرك أفقيًـا فـى نفس الوقت** . هذه الملاحظة تعطينا وصفًا لحركة المقذوفات .



عند إهمال مقاومة الـهواء يتحرك المقذوف أفقيًا بمعدل حركة ثابت أثناء سقوطه رأسيًا بعجلة قدرها g .

وسوف نقوم فى الفصل الثالث بتفسير هذا السلوك بدلالة قوانين نيوتن . ويكفينـا مؤقتـا قبول الحقيقة التجريبية بأن متجه سرعة المقذوف ، عند إهمال مقاومة الـهواء ، يمكـن فصلـها إلى مركبتين :

1 ـ المقذوف يتحرك رأسيًا بعجلة ثابتة قدرها g .

2 ـ فى نفس الوقت يتحرك المقذوف **بسرعة أفقية ثابتة** .

المقذوف المنطلق أفقيًا

يمثل الشكل 2–11 أ كرة بيسبول منطلقة أفقيا من النقطة A بسـرعة قيمتـها v_0 . وإذا كانت مقاومة الـهواء مهملة ستتحرك الكرة بنفس هذه السرعة الأفقية إلى أن تصطدم بأى شىء فى طريقها ، بمعنى أنـه ليس للكرة مـركبة أفقية للعجلة . فى نفس الوقت

تتزايد سرعة الكرة أثناء حركتها رأسيًا إلى أسفل بمعدل 9.8 m/s لكل ثانية أثناء السقوط الحر للكرة . لنحلل الآن هذا النوع من الحركة .

حيث أن الحركتين المتعامدتين مستقلتان إحداهما عن الأخرى ، يمكن تحليل كل منهما على حدة . لندرس أولاً الحركة الأفقية فهى بسيطة للغاية لأنها حركة خطية بسرعة ثابتة $\mathbf{v}_0$. إذن ، نظرًا لأن العجلة الأفقية تساوى صفرًا فإن المعادلتين اللتين تصفان المركبة الأفقية لحركة الكرة تكونان :

$$v_0 = v_f = \bar{v} = v_x \qquad x = \bar{v}\, t = v_x t \qquad (2\text{–}12)$$

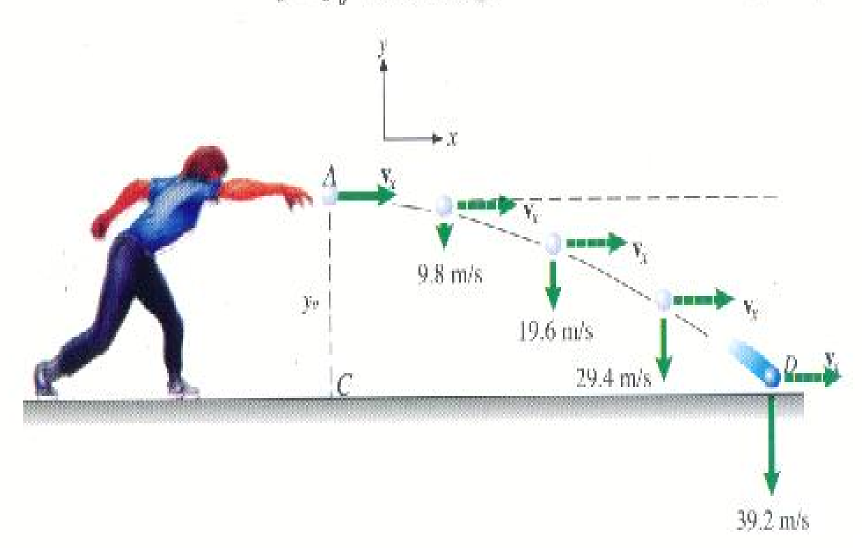
وفى الحركة الرأسية تتحرك الكرة فى الاتجاه y نتيجة لسقوطها تحت تأثير عجلة الجاذبية الأرضية ، ولهذا تنطبق معادلاتنا السابقة للحركة ذات العجلة المنتظمة على هذه المركبة لحركة الكرة . ويمكننا أن نرى من الشكل 11–2 أن القيمة الابتدائية لمركبة السرعة الرأسية صفر ، أى $v_{0y} = 0$. فإذا اعتبرنا $y = 0$ عند سطح الأرض يمكننا القول أن الموضع الرأسى الابتدائى للكرة هو y_0 . وعليه فإن الحركة الرأسية للكرة يمكن وصفها بالمعادلتين :

$$v_y = 0 + (-9.8\ \text{m/s}^2)t \qquad (2\text{–}13)$$

$$y - y_0 = 0 + \frac{1}{2}(-9.8\ \text{m/s}^2)t^2$$

إذن :

$$y = y_0 - (4.9\ \text{m/s}^2)t^2 \qquad (2\text{–}14)$$



شكل 11–2 :
الكرة المقذوفة تتحرك حركتين متعامدتين مستقلتين إحداهما عن الأخرى .

هذه هى المرة الأولى التى يستخدم فيها موضع ابتدائى (x_0 أو y_0) مختلف عن الصفر ، وهذا ليس مشكلة على الإطلاق لأن اختيار الموضع الابتدائى اعتباطى دائمًا .

طريقتنا إذن هى أن نعتبر أن حركة أى مقذوف بالقرب من سطح الأرض مكونة من حركتين مستقلتين . وإذا كانت مقاومة الهواء مهملة تكون الحركة الأفقية حركة ثابتة السرعة ، وتعالج الحركة الرأسية كحركة جسم ساقط سقوطًا حرًا على استقامة خط رأسى . بعدئذ تحسب كل حركة بشكل مستقل كإحدى مركبتى الحركة ثم يوجد الحلان للحصول على الإجابة الكاملة .

مثال 2-9 :

لندرس الموقف الموضح فى الشكل 11-2 . اعتبر أن الكرة تترك يد القاذف عند النقطة A بسرعة مقدارها 15 m/s فى الاتجاه أفقى . وبفرض أن النقطة A تقع على ارتفاع قدره 2.0 m من سطح الأرض ، أين ترتطم الكرة بسطح الأرض ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يعنى السؤال بدلالة المصطلحات المستخدمة فى المعادلات ؟

الإجابة : السؤال يعنى على أى بعد عن النقطة C (الواقعة تحت النقطة A مباشرة) تقع نقطة التصادم D فى الشكل 11-2 ؟ وبأسلوب أدق ، إذا اخترنا الاختيار المناسب باعتبار $x = 0$ عند النقطة C فسوف يتحول السؤال إلى « ما قيمة x عند موضع ارتطام الكرة بالأرض ؟ » هذه المسافة تسمى **مدى** المقذوف .

سؤال : ما معنى العبارة « ترتطم بالأرض » بدلالة معادلاتنا ؟

الإجابة : يقع سطح الأرض على بعد 2.0 m أسفل نقطة بداية الحركة . فإذا اعتبرنا أن $x = 0$ و $y = 0$ عند النقطة A فإن الكرة ترتطم بالأرض عند الموضع الرأسى $y = -2.0$ m .

سؤال : هل توجد علاقة تربط المجهول x بالكمية المعلومة y ؟

الإجابة : هذه العلاقة لم تستنتج بعد .

سؤال : إذا لم يكن لدينا أى معادلات تنطبق على هذا الموقف ، كيف يمكن حل المسألة ؟

الإجابة : بإدراك أن هناك علاقة غير مباشرة بين x و y من خلال متغير آخر هو الزمن الذى يظهر فى معادلتى الحركة اللتان تصفان مركبتى السرعة [والمعادلتان (12-2) و (14-2)] . علينا إذن إيجاد « زمن طيران » الكرة .

سؤال : ما مفهوم زمن الطيران بدلالة المصطلحات المستخدمة فى المعادلتين ؟

الإجابة : معناه الزمن اللازم لكى تنتقل الكرة من $y = 0$ إلى $y = -2.0$ m عندما تكون السرعة الابتدائية صفرًا . هذا الجزء من الحركة يسمى بإسقاط الكرة مسافة 2 m من السكون .

سؤال : أى المعادلات يستخدم لتعيين هذا الزمن ؟

الإجابة : من المعلوم عمومًا أن $y = y_0 - (4.9\ \text{m/s}^2)t^2$. وفى هذه الحالة $y_0 = 0$ عند نقطة البداية ، والمطلوب إيجاد الزمن t الناتج عند وضع $y = -2.0$ m .

سؤال : الآن وقد أوجدنا t ، من أى معادلة يمكن تعيين الموضع x الذى ترتطم عنده الكرة بالأرض ؟

الإجابة : طالما لم ترتطم الكرة بالأرض فإنها تظل متحركة أفقيا بسرعة قدرها 15 m/s . المعادلة التى تصف هذا هى المعادلة (12-2) : $x = v_x\, t$. زمن الطيران t إذن يعطى قيمة x عند موضع الارتطام بالأرض ؛ أى المدى .

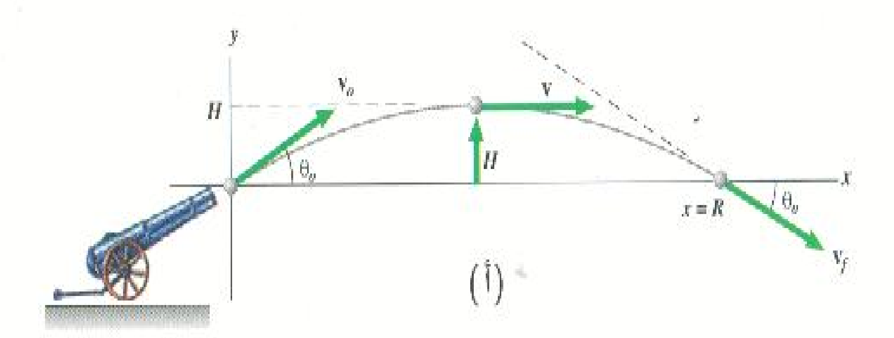
الحل والمناقشة :

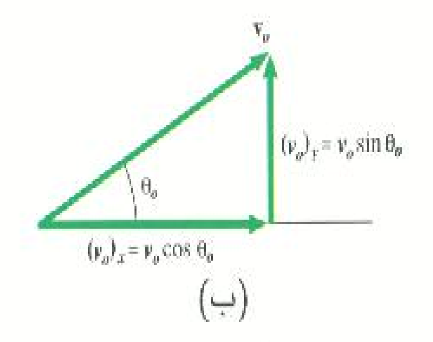
1 ـ يعين زمن الطيران من العلاقة $(2.0\ m) = (4.9\ m/s^2)t^2$ ، ومنه $t = 0.64\ s$.

2 ـ إذن ، المدى هو $x = (15\ m/s)\ (0.64\ s) = 9.6\ m$.

المقذوف المنطلق بزاوية

النوع العام الآخر من حركة المقذوفات هو حالة جسم مقذوف أو منطلق من مستوى الأرض بسرعة ابتدائية v_0 فى اتجاه يصنع زاوية θ_0 فوق الأفقي . لنفرض مثلاً أن المدفع فى الشكل 2-12 أ يطلق قذيفة . أثناء الحركة إلى اليمين ترتفع القذيفة تدريجيًا إلى أن تصل إلى أقصى ارتفاع H فوق الأرض ثم تبدأ فى الهبوط ، وفى النهاية ترتطم القذيفة بالأرض على مسافة ما من نقطة الانطلاق (تسمى أيضًا **مدى المقذوف**) . وتخضع حركة القذيفة أيضًا لنفس المبادئ السابق مناقشتها فى حالة المقذوفات الأفقية ، ولكن الشروط الابتدائية هنا مختلفة . لنفحص هذا الموقف بالتفصيل .





شكل 2-12 :
(أ) مسار مقذوف منطلق بزاوية .
(ب) مركبتا السرعة الابتدائية .

المركبة الأفقية للسرعة $\mathbf{v}_0$ هى $\mathbf{v}_0 \cos\theta_0$ (شكل 2-12 ب) . وفى هذا الجزء من الحركة ، كما فى المثال السابق ، تظل الحركة ثابتة لعدم وجود مركبة أفقية للعجلة .

إذن ، المعادلة التى تحكم الحركة الأفقية هى :

$$x = (v_0 \cos\theta_0)t$$

حيث افترضنا أن $x = 0$ عند نقطة الانطلاق .

أما المركبة الرأسية للسرعة فقد سبق مناقشتها فى المثال 2-7 ، باستثناء أن السرعة الابتدائية هنا $v_0 \sin\theta_0$ واتجاهها رأسى إلى أعلى . ومن ثم يمكن كتابة المعادلتين اللتين تصفان الحركة الرأسية مباشرة :

$$y = (v_0 \sin\theta_0)t + \frac{1}{2}(-9.8\ \text{m/s}^2)t^2$$

$$v_y = v_0 \sin\theta_0 + (-9.8\ \text{m/s}^2)t$$

لاحظ أن **مسار القذيفة** متماثل حول نقطة منتصف الطيران . وأحد نتائج هذا التماثل هو أن الزمن اللازم لكى تصل القذيفة إلى أقصى ارتفاع يساوى نصف الزمن الكلى للطيران . والتماثل يعنى أيضا أن قيمتى مقدار السرعة التى ترتطم بها القذيفة بالأرض وزاوية الارتطام يظلان مساويين لقيمتيهما الابتدائيتين ، باستثناء أن اتجاه السرعة يكون إلى الداخل بدلاً من الخارج .

لاحظنا فى المثال 9-2 أنه ليس لدينا بعد معادلة تربط x و y مباشرة . ولكن يمكننا باستخدام المعادلتين السابقتين حذف الزمن t واشتقاق مثل هذه العلاقة وتسمى **معادلة مسار القذيفة** . وعليه فمن معادلة x نجد أن $t = x/(v_0 \cos\theta_0)$ ، وبالتعويض عن هذه الكمية فى معادلة y نحصل على :

$$y = (\tan\theta_0)x - \left(\frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta_0}\right)x^2 \qquad (2\text{-}15)$$

(وحيث استخدمنا حقيقة أن $\sin\theta/\cos\theta = \tan\theta$) . هذه معادلة تربيعية على الصورة $y = ax^2 + bx$ حيث $a = \tan\theta_0$ ، $b = g/2v_0^2\cos^2\theta_0$.

مثال 2-10 :

لنفرض أن لديك بندقية تطلق القذيفة بسرعة ابتدائية (« السرعة الفوهية ») قدرها 0.800 km/h . فإذا وجهت البندقية بزاوية قدرها 30.0° فوق الأفقى ، فعلى أى بعد ترتطم القذيفة بالأرض ، بفرض أنها على نفس مستوى إطلاق القذيفة ؟ ما الزمن الذى تقضيه القذيفة فى الهواء وإلى أى ارتفاع تصل ؟ إهمل مقاومة الهواء .

I

استدلال منطقى :

سؤال : ما المعطيات التى لديك ؟

الإجابة : $\theta_0 = 30.0°$ $\quad g = -9.8\ \text{m/s}^2 \quad v_0 = 0.800\ \text{km/h}$

سؤال : هل الوحدات متسقة مع بعضها البعض ؟

الإجابة : لا . قبل استخدام الأعداد يجب تحويل الكمية 0.800 km/h إلى m/s .

سؤال : هل يمكن إيجاد مدى القذيفة مباشرة من المعطيات ؟

الإجابة : نعم ، لأنه يمكن حسابه باستخدام معادلة مسار القذيفة .

سؤال : ما علاقة العبارة « ترتطم بالأرض » بالكميات الموجودة فى معادلة مسار القذيفة ؟

الإجابة : معناها أن المطلوب هو إيجاد قيمة x للموضع الذى ترتطم فيه القذيفة بالأرض ، أى عندما $y = 0$.

الحل والمناقشة : عند وضع $y = 0$ في معادلة مسار القذيفة نحصل على :

$$0 = (\tan 30.0°)x - \left[\frac{4.9\ \mathrm{m/s^2}}{(800\ \mathrm{m/s^2})(\cos^2 30.0\ \ )}\right]x^2$$

لاحظ وجود حلين (أى ان x لها قيمتان عند $y = 0$) أحدهما $x = 0$ وهو يمثل موضع بداية القذيفة . وبقسمة المعادلة السابقة على x سنجد أن الحل الآخر هو :

$$x = \frac{(\tan 30.0°)(\cos^2 30.0°)(800\ \mathrm{m/s})^2}{4.90\ \mathrm{m/s^2}} = 56{,}600\ \mathrm{m} = 56.6\ \mathrm{km}$$

وهذا يساوى 34 mi تقريبًا !

سؤال : من أى معادلة يمكن تعيين زمن الطيران ؟

الإجابة : إما معادلة x بدلالة t (تحل المعادلة بالنسبة إلى t عندما $x = 56.6\ \mathrm{km}$) ، أو معادلة y بدلالة t (تحل المعادلة بالنسبة إلى t عندما $y = 0$) .

الحل والمناقشة : من معادلة y بدلالة t :

$$0 = v_0 (\sin 30.0°)t - \frac{1}{2}gt^2$$

نحصل على $t = 0$ وكذلك :

$$t = \frac{2v_0(\sin 30.0°)}{g} = \frac{(1600\ \mathrm{m/s})(0.500)}{9.80\ \mathrm{m/s^2}}$$

$$= 81.5\ \mathrm{s} = 1.36\ \mathrm{min}$$

ومن معادلة x بدلالة t نجد أن $56.6 \times 10^3\ \mathrm{m} = v_0 (\cos 30.0°)\ t$ ، التى تعطى $t = (56.6 \times 10^3\ \mathrm{m})/(800\ \mathrm{m/s})\ (0.866) = 81.7\ \mathrm{s}$. والفرق بين الإجابتين ناشئ عن خطأ التقريب الحسابى .

سؤال : ما الشرط الذى يعطى أقصى ارتفاع ؟

الإجابة : أقصى ارتفاع يكون في اللحظة التي تكون فيها $v_y = 0$ ؛ وقبل هذه اللحظة مباشرة تكون v_y موجبة وبعدها مباشرة تكون سالبة .

سؤال : هل توجد أى علاقة تربط بين y و v_y مباشرة ؟

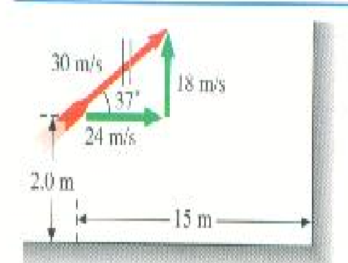
الإجابة : نعم ، وهى المعادلة (2–11 د) عند تطبيقها على الاتجاه y :

$$(v_y)_f^2 = (v_y)_0^2 - 2gy\ .$$

الحل والمناقشة : يمكن الحصول على أقصى ارتفاع $(y = H)$ من :

$$0 = (800\ \mathrm{m/s})^2 (\sin^2 30.0°) - 2(9.80\ \mathrm{m/s^2})H$$

$$H = 8160\ \mathrm{m} = 8.16\ \mathrm{km}$$



شكل 2-13 :
أين يصطدم السهم بالحائط ؟ هل سيكون السهم مازال صاعدًا قبل اصطدامه بالأرض مباشرة أم سيكون في طريقه إلى أسفل .

مثال 2-11 :

أطلق سهم بسرعة قدرها 30.0 m/s بزاوية 37.0° فوق الأفقى ، وفي البداية كان السهم على ارتفاع 2.00 m فوق سطح الأرض وعلى بعد 15.0 m من حائط كما هو مبين بالشكل 2-13 . (أ) على أى ارتفاع فوق سطح الأرض يصطدم السهم بالحائط ؟ (ب) هل سيكون السهم مازال صاعدًا قبل اصطدامه بالحائط مباشرة أم سيكون في طريقه إلى أسفل ؟ إهمل الاحتكاك .

استدلال منطقى :

سؤال : ما ترجمة السؤال (أ) بالمصطلحات المستخدمة في معادلات الحركة ؟

الإجابة : إنه يسأل « ما قيمة y عندما $x = 15.0$ m (حيث يوجد الحائط) ؟

سؤال : هل تنطبق معادلة مسار المقذوف ؟

الإجابة : نعم . فبالرغم من أن معادلة مسار المقذوف قد اشتقت بالنسبة لحالة يكون فيها ارتفاعى نقطتى الإطلاق والتصادم متساويين فإن أى زوج من قيم x و y الواقعة على مسار المقذوف يتبع المعادلة (2–15) ، وهكذا يمكن وضع $x = 15.0$ m في المعادلة ثم حلها بالنسبة إلى الارتفاع المناظر لتلك النقطة على مسار المقذوف .

سؤال : ما الكميات المعلومة في معادلة مسار المقذوف ؟

الإجابة : $y_0 = 0$ ، $v_0 = 30.0$ m/s ، $g = 9.80$ m/s² ، $\theta_0 = 37.0°$ وذلك نفرض أن الارتفاع يقاس بالنسبة إلى نقطة الإطلاق .

سؤال : أى ارتفاع يمكن أن نعتبره الارتفاع y_0 .

الإجابة : هذا الاختيار اعتباطى . وفي هذه الحالة من المناسب اختيار مستوى سطح الأرض أو ارتفاع نقطة الإطلاق على أنه y_0 . ومهما كان اختيارك عليك أن تلتزم به في المسألة كلها .

سؤال : كيف نعلم ما إذا كان السهم صاعدًا أو هابطًا عند لحظة الاصطدام ؟

الإجابة : إشارة v_y عند تلك اللحظة ؛ فإذا كانت موجبة فإنه يكون صاعدا ؛ وإذا كانت سالبة كان السهم هابطًا .

سؤال : معادلة مسار المقذوف لا تحتوى على v_y . ما المعادلة التى يمكننى استخدامها ؟

الإجابة : إحدى معادلات الحركة على استقامة المحور y ولتكن : $v_y = v_{0y} - gt$.

فإذا أمكن إيجاد زمن الاصطدام يمكن حساب قيمة v_y بإشارتيها .

سؤال : ما الشرط الذى يمكن به تعيين الزمن اللازم لكى يصطدم السهم بالحائط ؟

الإجابة : الشرط هو أن $x = 15.0$ m عند لحظة التصادم t ؛ والعلاقة بين هاتين الكميتين هى معادلة الحركة الأفقية : $x = v_{0x}t$.

الحل والمناقشة :

1 ـ قيمة y عندما $x = 15.0$ m هى :

$$y = (\tan 37.0°)(15.0\ m) - \frac{9.8\ m/s^2}{2(30.0\ m/s)^2 \cos^2 37.0}$$

$$= 11.3\ m - 1.9\ m = 9.4\ m$$

2 - زمن الاصطدام مع الحائط هو :

$$t = \frac{x}{v_0 \cos 37.0^0} = \frac{15.0\ m}{(30.0\ m/s)(0.800)}$$

3 - الحركية الرأسية للسرعة عند هذا الزمن هى :

$$v_y = v_0 \sin 37.0° - gt$$

$$= (30.0\ m/s)(0.600) - (9.80\ m/s^2)(0.625\ s) = +11.9\ m/s^2$$

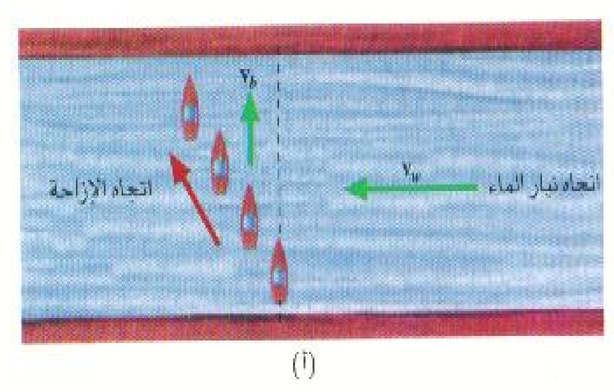
وعليه فإن السهم يصطدم بالحائط وهو مازال صاعدًا وقبل أن يصل إلى قمة مسار الطيران مباشرة .

تمرين : أوجد مقدار واتجاه متجه السرعة فى لحظة اصطدام السهم بالحائط بمعلومية مركبتى سرعة السهم فى المثال 11-2 .

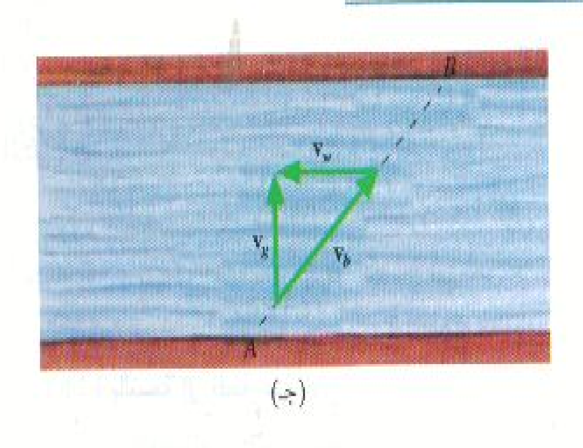
الإجابة : $v = 26.8\ m/s$ بزاوية قدرها $26.4°$ فوق الأفقى .

تمرين : على أى مسافة يجب أن يبعد الحائط حتى يصطدم به السهم على نفس ارتفاع نقطة الانطلاق (9.3 m) ، ولكن فى رحلة الهبوط ؟

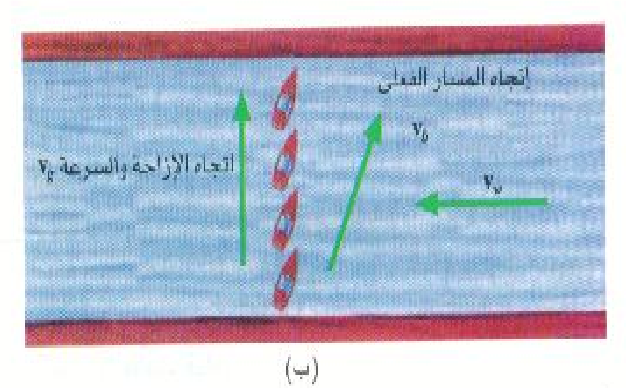
الإجابة : 73.2 m .



(أ)



(جـ)



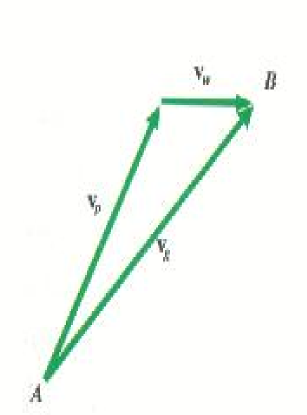
(ب)

شكل 14-2 :
(أ) سرعة الماء تجعل القارب يتحرك فى اتجـــاه مـــائل بزاوية معينة بالنسبة إلى وجهته إلى النقطة المقابلة مباشرة .
(ب) بتوجيه القارب بزاوية صغيرة ضد التيار يتمكن القـــارب من الوصول إلى النقطة المقابلـــة مبـــاشرة . (جــ) الجمع الاتجاهى لسرعتى قارب متحرك عبر النهر مبـــاشرة . تجمــع سـرعة الماء على السرعة v_b لتصبح إزاحة القارب فى اتجاه AB ويكون متحركا بسرعة قدرها v_R .

2-11 جمع السرعات فى بعدين : السرعة النسبية

من المواقف التى تستلزم جمع المتجهات حالة قارب يعبر نهرًا منسابًا أو حالة طائرة تطير فى هواء متحرك . فالقارب المبين بالشكل 14-2 أ ، والموجهة مقدمته تجاه الشاطئ مباشرة ، سوف ينجرف مع التيار أثناء عبور النهر . فإذا أراد شخص بالقارب أن يعبر النهر إلى النقطة المقابلة له مباشرة فعليه أن يأخذ سرعة التيار المائى فى الاعتبار بتوجيه القارب بزاوية معينة بالنسبة لاتجاه التيار (شكل 14-2 ب) . وبالمثل يجب أن تؤخذ سرعة الريح فى الاعتبار عند اختيار اتجاه الطائرة أثناء الطيران من مدينة إلى أخرى . لنتعرف الآن على كيفية وصف هذا النوع من الحركة بطريقة جمع المتجهات .

لنأخذ كمثال حالة طائرة تريد أن تطير فى خط مستقيم من مدينة ما A إلى أخرى B فى وجود رياح ثابتة السرعة . لدينا هنا ثلاث سرعات : الأولى سرعة الرياح بالنسبة إلى الأرض $\mathbf{v}_w$ ، والثانية هى سرعة الطائرة فى اتجاه توجيهها $\mathbf{v}_p$ وهى سرعة الطائرة فى هذا الاتجاه إذا كان الهواء ساكنًا ، وأخيرًا سرعة الطائرة بالنسبة إلى الأرض $\mathbf{v}_g$ وهى فى اتجاه إزاحة الطائرة . وواضح من الشكل 15-2 ب أن هذه السرعة هى محصلة السرعتين الأخريين .



شكل 15-2 : جمع السرعات فى حالة طائرة تطير من A إلى B . $\mathbf{v}_p$ هى السرعة فى اتجاه توجيه الطائرة . $\mathbf{v}_g$ هى سرعة الطائرة بالنسبة إلى الأرض وتكون فى اتجاه الإزاحة .

$$\mathbf{v}_g = \mathbf{v}_w - \mathbf{v}_p \qquad (2\text{–}16 \text{ أ})$$

وتنطبق نفس هذه الطريقة لجمع المتجهات أيضًا على القارب الذى يعبر النهر ، وهذا مبين بالشكل 14-2 ب . ويلاحظ فى هذه الحالة أن $\mathbf{v}_b$ تمثل سرعة القارب بالنسبة إلى الماء وأن $\mathbf{v}_w$ هى سرعة تيار الماء :

$$\mathbf{v}_g = \mathbf{v}_w + \mathbf{v}_b \qquad (2\text{–}16 \text{ ب})$$

ويمكن تلخيص تحليل هذا النوع من الحركة كما يأتى :

1 - السرعة $\mathbf{v}_g$ وإزاحة القارب أو الطائرة تكونان فى نفس الاتجاه بالنسبة إلى الأرض . ومن ثم يمكن التعرف على اتجاه $\mathbf{v}_g$ بمعلومية الاتجاه الذى يجب أن يسير فيه القارب أو الطائرة بالنسبة إلى نقطة على الأرض . وبعد تحديد هذا الاتجاه تذكر أن رسم بيانى المتجهات للمعادلتين (16-2) يتضمن متجهات **سرعة** وليس متجهات إزاحة .

2 - السرعة $\mathbf{v}_b$ أو $\mathbf{v}_p$ تكون فى اتجاه **توجيه القارب أو الطائرة** . وعمومًا يكون اتجاه $\mathbf{v}_b$ أو $\mathbf{v}_p$ مختلفا عن اتجاه الحركة بالنسبة إلى الأرض . ذلك أن مقدار السرعة فى اتجاه نقطة الوصول هو سرعة القارب أو الطائرة عندما يكون الهواء أو الماء ساكنا .

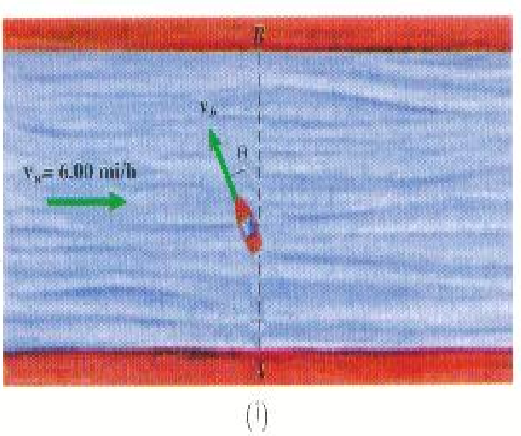
مثال توضيحى 2-2 :

سرعة التيار فى الشكل 16-2 أ تساوى 6.00 mi/s فى الاتجاه الموضح . والمطلوب قيادة القارب عبر النهار ابتداء من النقطة A على أحد الشاطئين ليصل إلى النقطة المقابلة

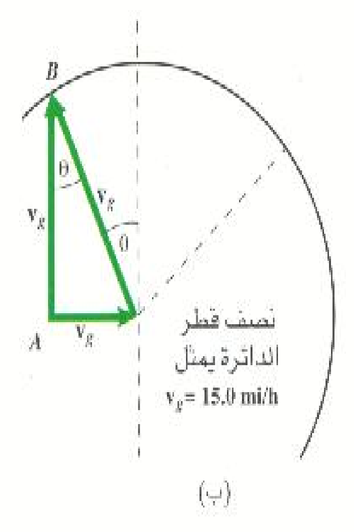
مباشرة على الشاطئ الآخر B . فإذا كان قاربك يتحرك بمعدل قدره 15 mi/h فـي المـاء الساكن ، فبأى زاوية ضد التيار يجب توجيه القارب ؟

استدلال منطقى :

الطريقة البيانية : مسار الرحلة من A إلى B هو الذى يحدد اتجاه السـرعة v_g وتسـاوى المجموع الاتجاهى للسرعتين v_w و . v_b . ولكن v_g معلومة مقدارًا واتجاهًا ، كما أن v_b معلومة مقـدارًا وليس اتجاهًا . ويمكنـك الحصـول علـى رسـم بيـانى السـرعات باتبـاع الخطوات الآتية :



(أ)



(ب)

شكل 16-2 :
(أ) ما قيمة الزاوية θ التى يوجه القـارب عليها حتى يصل من A إلـى B ؟ مقـدار سرعة القارب v_b = 15.0 mi/h .
(ب) يمكن تعيين زاوية توجيـه القـارب θ بيانيًا . لاحـظ أيضًـا أن $v = v_b \sin\theta$ و $v_b \cos\theta = v_g$.

1 ـ ارسم خطًا مستقيمًا في اتجاه AB ، وهذا سيكون اتجاه v_g .

2 ـ اختر مقياس رسم مناسب لتمثيل مقدار السرعة ، وليكن 10.0 mi/h = 10.0 cm .
ارسم المتجه v_w ابتداء من بداية الخط الذى قمت برسمه ، وباستخدام مقياس الرسم المقترح سيكون هذا المتجه خطًا مستقيمًا عموديًا علـى AB فـى اتجـاه التيـار وطولـه 6.00 cm .

3 ـ ارسم من رأس المتجه v_w دائرة نصـف قطرهـا يمثـل مقـدار v_b ، أى 15.0 mi/h . وباستخدام مقياس الرسم المختار سيكون نصف قطر هذه الدائرة 15.0 cm . وعندئـذ يتعين المتجه v_b بنقطة تقاطع هذه الدائرة مع الخط AB ، ويكون حاصل جمـع v_b على v_w هو السرعة v_g . ومن الرسم يمكن إيجاد توجيه القـارب (أى اتجـاه v_b) ومقدار v_g .

الطريقة التحليلية : لكى نحصل على متجه السرعة المحصلة فى اتجاه AB يجب أن تكون مركبة $\mathbf{v}_b$ الموازية للتيار مساوية لسرعة التيار $\mathbf{v}_w$ ومضادة لها فى الاتجاه . فإذا كانت θ هى الزاوية بين $\mathbf{v}_b$ و $\mathbf{v}_g$ فإن :

$$v_b \sin\theta = v_w$$

ومن ثم :

$$\theta = \sin^{-1}\frac{v_w}{v_b} = \sin^{-1}\frac{6.00}{15.0} = \sin^{-1}0.400$$

وهكذا يمكن إيجاد مقدار $\mathbf{v}_g$:

$$v_g = v_b \cos\theta = (15.0\ \text{mi/h})\cos 23.6° = 13.7\ \text{mi/h}$$

تمرين : إذا كان عرض النهر 1.8 mi ، فما الزمن اللازم للقارب لكى يصل إلى الجانب الآخر ؟ **الإجابة** : 32.8 s .



مثال 2-12 :

تستطيع طائرتك أن تطير بمعدل 220 mi/h فى الهواء الساكن ، وتريد أن تطير من بلدتك إلى مدينة تقع على بعد 325 mi إلى الشمال مباشرة . فإذا كانت الرياح تهب تجاه الشرق مباشرة وسرعتها 25 mi/h ، فما هو الاتجاه الواجب توجيه الطائرة إليه وما الزمن الذى تستغرقه الرحلة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف نرسم رسمًا بيانى المتجهات ؟

الإجابة : بطريقة مماثلة تقريبا لما فى المثال التوضيحى السابق ، ولكن لن نحصل هنا على مثلث قائم الزاوية . ويمثل الشكل 17-2 رسمًا تخطيطيًا للموقف .

سؤال : بأى زاوية توجه الطائرة ؟

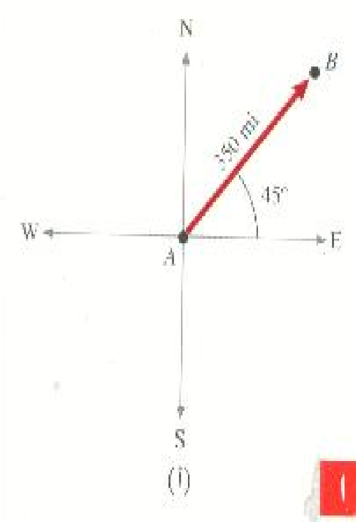
الإجابة : الزاوية θ تحدد لنا بأى زاوية شمال الشرق يجب قيادة الطائرة . وإذا أردت التعبير عن ذلك فى صورة قراءة للبوصلة ، حيث تكون قراءة الاتجاه الشمال 0° ، يجب طرح θ من 90° .

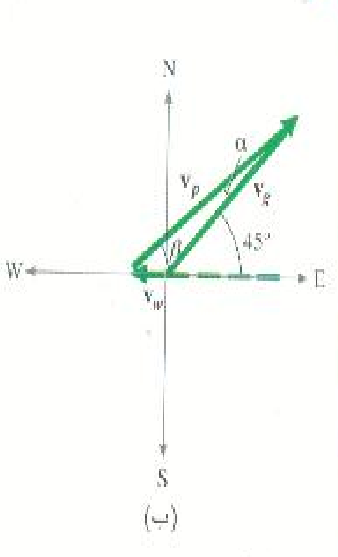
سؤال : كيف نعين زمن الرحلة ؟

الإجابة : يراد الطيران مسافة 350 mi فى اتجاه v_g . وبذلك يكون الزمن المطلوب t هو $t = 350\ \text{mi}/v_g$.

سؤال : إذا لم يكن مثلث المتجهات قائم الزاوية ، فكيف يمكن الحل تحليليًا ؟

الإجابة : **قانون الجيوب** (انظر الغلاف الخلفى من الداخل) هو علاقة بسيطة ذات فائدة كبيرة بين أطوال أضلاع أى مثلث وزواياه . وإذا كانت أى زاويتين وأحد أضلاع المثلث ملعومة يمكن حساب الضلعين الآخرين .





شكل 17-2 :
(أ) متجه إزاحة الطائرة فى المثال 12-2 . اتجاه AB هو نفس اتجاه السرعة $\mathbf{v}_g$.
(ب) جمع متجهى السرعة ، ومنه يمكن إيجاد السرعة بالنسبة إلى الأرض $\mathbf{v}_g$ والزاوية θ .

سؤال : ما هى البيانات المعلومة فى مثلث المتجهات ؟

الإجابة : نحن نعلم الضلعين $\mathbf{v}_w$ و $\mathbf{v}_p$ والزاوية التى تقابل $\mathbf{v}_p$ ،وبذلك يمكن استخدام قانون الجيوب مرتين . أولاً : لإيجاد الزاوية التى تقابل $\mathbf{v}_w$ ثم الزاوية θ التى تقابل $\mathbf{v}_g$ إذ أن مجموع زوايا أى مثلث يساوى $180°$. ثانيًا لإيجاد قيمة $\mathbf{v}_g$ بتطبيق قانون الجيوب مرة أخرى .

الحل والمناقشة : الزاوية التى تقابل $\mathbf{v}_p$ تساوى $135°$. إذن من قانون الجيوب نحصل على :

$$\frac{v_w}{\sin\alpha} = \frac{v_p}{\sin 135^o}$$

$$\sin\alpha = \left(\frac{25}{220}\right)\sin 135° = 0.80 \qquad \alpha = 4.61°$$

وعليه فإن β تكون :

$$\beta = 180.0° - 135.0° - 4.6° = 40.4°$$

وبتطبيق قانون الجيوب مرة ثانية :

$$\frac{v_g}{\sin 40.4^o} = \frac{v_p}{\sin 135^o}$$

هذا يعطى $v_g = 0.917\, v_p = 202$ mi/h . وهكذا فإن الزمن الذى تستغرقه رحلة طولها 350 mi يكون :

$$t = \frac{350 \text{ mi}}{202 \text{ mi / h}} = 1.73 \text{ h} = 1 \text{ h},\ 44 \text{ min}$$

لاحظ أن الرحلة فى الهواء الساكن تستغرق :

$$\frac{350 \text{ mi}}{220 \text{ mi / h}} = 1.59 \text{ h} = 1 \text{ h},\ 35 \text{ min}$$

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل ينبغى أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) معدل الحركة ، (ب) السرعة ، (جـ) العجلة ، (د) عجلة الجاذبية . (هـ) السقوط الحر .

2 ـ وصف طريقة قياس (أ) السرعة المتوسطة لجسم أثناء حركته من A إلى B ، (ب) السرعة اللحظية عند أى نقطة فى المسار .

3 ـ حساب سرعة جسم عند أى لحظة إذا أعطيت رسمًا بيانيًا للحركة يمثل الموضع كدالة فى الزمن .

4 ـ حساب عجلة جسم عند أى لحظة إذا أعطيت رسمًا بيانيًا لسرعته كدالة فى الزمن .

5 ـ كتابة معادلات الحركة المنتظمة الخمس وشرح الرموز فيها ، وكتابة شروط تطبيق هذه المعادلات .

6 ـ حل المسائل البسيطة المتعلقة بالحركة ذات العجلة المنتظمة بما فيها السقوط الحر .

7 ـ إيجاد المسافة المقطوعة وزمن الطيران لكل من : (أ) مقذوف منطلق أفقيًا من ارتفاع معين فوق مستوى الأرض ، (ب) مقذوف منطلق فوق مستوى الأرض بزاوية معينة فوق الأفقى .

8 ـ إيجاد زاوية توجيه وسرعة قارب أو طائرة تتحرك في وجود تيار أو رياح عندما تكون الإزاحة المطلوبة معطاة .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية

عجلة الجاذبية (g) : عجلة السقوط الحر للأجسام بالقرب من سطح الأرض هي : $g = 9.8\ m/s^2$.

تعريفات ومبادئ أساسية :

متوسط معدل الحركة ($\bar{v}$) :

$$\text{متوسط معدل الحركة} = \bar{v} = \frac{\text{المسافة المقطوعة}}{\text{الزمن المار}} = \frac{x}{t} \qquad (2-1)$$

السرعة المتوسطة ($\bar{v}$) :

$$\text{السرعة المتوسطة} = \bar{\mathbf{v}} = \frac{\text{متجه الإزاحة}}{\text{الزمن المار}} = \frac{s}{t} \qquad (2-2)$$

السرعة اللحظية :

عندما تكون الفترة الزمنية التي تقاس خلالها السرعة المتوسطة قريبة من الصفر تصبح السرعة المتوسطة مساوية للسرعة اللحظية في تلك اللحظة .

$$\text{السرعة اللحظية} = \mathbf{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (2-3)$$

خلاصة :

1 ـ **المقدار** : مقدار السرعة اللحظية هو معدل الحركة في تلك اللحظة .

2 ـ **الاتجاه** : اتجاه السرعة هو اتجاه الإزاحة .

3 ـ **التفسير البياني (الحركة في بعد واحد)** : ميل منحنى x مقابل t عند أي لحظة يساوي السرعة عند تلك اللحظة .

العجلة المتوسطة ($\bar{a}$)

العجلة المتوسطة هي التغير في السرعة مقسومًا على زمن حدوث هذا التغير :

$$\bar{a} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0}{t} \qquad (2-4)$$

خلاصة

1 ـ اتجاه العجلة هو اتجاه تغير السرعة .

2 ـ حيث أن السرعة متجه فإنها يمكن أن تتغير في المقدار أو الاتجاه ، وعليه فإن الجسم يكون متحركا بعجلة إذا كان أي من مقدار سرعته أو اتجاهها متغيرًا .

3 ـ **التفسير البياني (الحركة في بعد واحد)** : ميل منحنى السرعة مقابل الزمن عند أي لحظة يمثل العجلة اللحظية عند تلك اللحظة .

معادلات الحركة ذات العجلة المنتظمة في بعد واحد

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{v}}\,t \qquad \text{(2-11 أ)}$$

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{1}{2}(\mathbf{v}_f + \mathbf{v}_0) \qquad \text{(2-11 ب)}$$

$$\mathbf{v}_f = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t \qquad \text{(2-11 جـ)}$$

$$v_f^2 = v_0^2 + 2ax \qquad \text{(2-11 د)}$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2 \qquad \text{(2-11 هـ)}$$

خلاصة :

1 ـ السقوط الحر تحت تأثير الجاذبية الأرضية مثال للحركة ذات العجلة المنتظمة حيث $\mathbf{a} = g = 9.8\ \text{m/s}^2$ عند سطح الأرض .

2 ـ العجلة في الاتجاه المعاكس للسرعة تمثل تباطؤًا ؛ والعجلة في نفس اتجاه السرعة تمثل تسارعًا .

معادلات حركة المقذوفات :

المقذوف المنطلق أفقيًا :

المركبة x : $v_x = v_0 = v_f$ (ولا توجد عجلة أفقية)

$x = v_x t$

المركبة y : $v_y = gt$ $(v_{oy} = 0)$

$y - y_0 = \frac{1}{2}gt^2$ $(v_{oy} = 0)$

المقذوف المنطلق بزاوية θ بسرعة قدرها $\mathbf{v}_0$

المركبة x : $v_x = v_0 \cos\theta_0 = \text{constant}$

$x = (v_0 \sin\theta_0)\,t$ $(x_0 = 0)$

المركبة y : $v_y = v_0 \sin\theta_0 - gt$

$y = (v_0 \sin\theta_0)t - \frac{1}{2}gt^2$ $(y_0 = 0)$

معادلة مسار المقذوف :

$$y = (\tan\theta_0)x - \left(\frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta}\right)x^2 \qquad (2\text{-}15)$$

خلاصة

1 ـ مدى المقذوف هو قيمة x عند ارتطام المقذوف بالأرض (أى عند $y = 0$ عادة) .

2 ـ زمن الطيران هو الزمن المار بين لحظة الإطلاق ولحظة الاصطدام ، أى أنه قيمة t المناظرة لقيمة x عند الاصطدام (المدى) .

3 ـ فى حالة مقذوف منطلق ذى مركبة سرعة فى الاتجاه الرأسى إلى أعلى يصل المقذوف إلى أقصى ارتفاع عند $v_y = 0$.

جمع السرعات فى بعدين

القارب أو الطائرة المتحرك بسرعة قيادة قدرها $\mathbf{v}_b$ (أو $\mathbf{v}_p$) فى وجود تيار أو ريح سرعتها $\mathbf{v}_w$ تكون سرعته بالنسبة إلى الأرض

$\mathbf{v}_g$: حيث :

$$\mathbf{v}_g = \mathbf{v}_w + \mathbf{v}_p \qquad \text{أو} \qquad \mathbf{v}_g = \mathbf{v}_w + \mathbf{v}_b$$

خلاصة :

1 ـ إزاحة القارب أو الطائرة بالنسبة إلى الأرض تكون فى اتجاه $\mathbf{v}_g$.

2 ـ إذا علمت السرعة $\mathbf{v}_w$ ومقدار $\mathbf{v}_b$ (أو $\mathbf{v}_p$) واتجاه $\mathbf{v}_g$ معلومة يمكن إيجاد اتجاه $\mathbf{v}_p$ ومقدار $\mathbf{v}_g$.

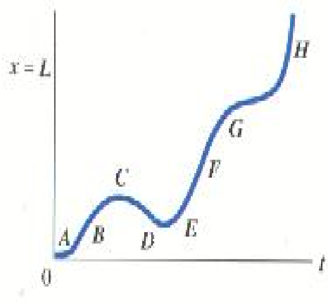
أسئلة وتخمينات

1 ـ اضرب مثلاً لحالة تكون سرعة الجسم فيها صفرًا ولكن عجلته ليست صفرًا .

2 ـ هل يمكن أن يكون اتجاه سرعة جسم مختلفًا عن اتجاه عجلته ؟ اشرح ذلك .

3 ـ ارسم رسمًا تخطيطيًا للسرعة والعجلة كدالة فى الزمن فى حالة سيارة تصطدم بعمود أسلاك التليفونات . كرر ذلك فى حالة التصادم المستقيم لكرة البلياردو مع حافة منضدة البلياردو .

4 ـ اذكر ما إذا كان أى من العبارات الآتيـة صحيحًا . (أ) يمكن أن تكون سرعة جسم ثابتة حتى إذا كان مقدار السرعة متغيرًا . (ب) يمكن أن يكون مقدار سرعة جسم ثابتة حتى إذا كانت سرعته متغيرة . (جـ) يمكن أن تكون سرعة جسم صفرًا حتى إذا كانت عجلته ليست صفرًا . (د) يمكن أن يحتفظ جسم بسرعته وهو تحت تأثير عجلة ثابتة .



شكل م 1-2

5 ـ دخل أرنب ماسورة تصريف طولها L من أحد طرفيها وكانت حركته كما هو يبين الشكل م 1-2 . صف هذه الحركة بالألفاظ .

6 ـ قطعت طالبة بالمدرسة الثانوية مسافة 100 m عدوًا بالدوران مرتين فى مضمار مدرستها الدائرى وهو مضمار طول محيطه 50 m . فإذا كانت هذه الطالبة عداءة من المستوى المتوسط ، قدر متوسط معدل حركتها وسرعتها المتوسطة .

7 ـ قذف حجر رأسيًا إلى أعلى فى الهواء فوصل إلى ارتفاع قدره h ثم عاد إلى قاذفه . ارسم المنحنيات البيانية الآتية بحيث تغطى فترة وجود الحجر فى الهواء : y مقابل t ، v مقابل t ، a مقابل t .

8 ـ تحت أى شرط يكون القول أن عجلة جسم ما سالبة عندما يكون هذا الجسم مقذوفًا رأسيًا إلى أعلى ؟ هل تتوقف إشارة العجلة على اتجاه الحركة ؟ هل يمكن أن تكون عجلة الجسم موجبة عندما يكون متباطئًا ؟

9 ـ عجلة الجاذبية على سطح القمر حوالى سدس قيمتها على سطح الأرض . أعط القيمة تقريبية للنسبة بين الارتفاع الذى يمكن أن تصل إليه كرة بيسبول قمت بقذفها إلى أعلى وأنت على سطح القمر بالارتفاع المناظر وأنت على سطح الأرض .

10 ـ كيف تحلل الشكل 2-8 أفضل تحليل للحصول على قيمة g ؟ افترض أن الزمن بين الومضات الضوئية المتتالية معلوم .

11 ـ أقام بعض محبى الطائرات مسابقة لإظهار مهاراتهم . وكنت المسابقة تتلخص فى إسقاط كيس ملئ بالرمل فى مركز دائرة مرسومة على سطح الأرض أثناء الطيران على ارتفاع معين وبمقدار سرعة معين . ما الصعوبة فى ذلك ؟ هل يمكن إسقاط كيس الرمل والطائرة فوق مركز الدائرة مباشرة ؟

مسائل

الأقسام من 2-2 إلى 2-5

1 ـ تستغرق طائرة ساعتين وثلاثين دقيقة لقطع المسافة من مينابوليس ـ سان بول إلى مدينة نيويورك وقدرها 1200 ميلاً جويًا . ما متوسط مقدار سرعة الطائرات بالوحدات mi/h ؟ وبالوحدات m/s ؟

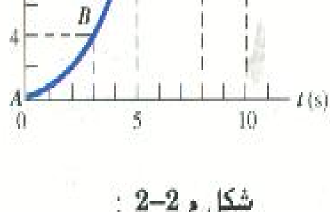
2 ـ معجل جسيمات يطلق إلكترونات متحركة بمعدل 2.99×10^8 m/s . ما الزمن اللازم لمثل هذه الجسيمات لكى تقطع مسافة قدرها 5.0 mm ؟

3 ـ تنبعث الإلكترونات فى أنبوبة التليفزيون من قطب فى أحد طرفيها وتصطدم بالطبقة الباعثة للضوء الموجودة على الشاشة الواقعة فى الطرف الآخر للأنبوبة . فإذا كانت الإلكترونات تنبعث بسرعة قدرها 1.25×10^8 m/s ، فما الزمن اللازم لكى تصطدم بالشاشة الواقعة على بعد 16.7 cm ؟

4 ـ يتحرك الصوت فى الهواء الساكن بسرعة مقدارها 340 m/s تقريبًا . فإذا أطلقت صيحة عبر واد ضيق وسمعت الصدى المنعكس من الجانب الآخر بعد 3.5 s ، فما بعد الجانب الآخر عنك ؟

5 ـ فى أحد ألعاب الفيديو تتحرك نقطة على الشاشة مسافة 9.6 cm فى الاتجاه الموجب للمحور y ثم 3.6 cm فى الاتجاه السالب للمحور x ويتم ذلك فى زمن كلى قدره 3.9 s . ما السرعة المتوسطة خلال هذا الزمن ؟ وما مقدار معدل الحركة ؟

6 ـ للوصول إلى محل عملك يتحتم عليك قيادة سيارتك 2.2 mi شرقًا ثم 1.5 mi جنوبًا ثم 3.7 mi بزاوية قدرها 45° جنوب الشرق ، وتستغرق هذه الرحلة 21 min .
(أ) ما قيمة سرعتك المتوسطة ؟ وما قيمة معدل حركتك ؟



شكل م 2-2 :

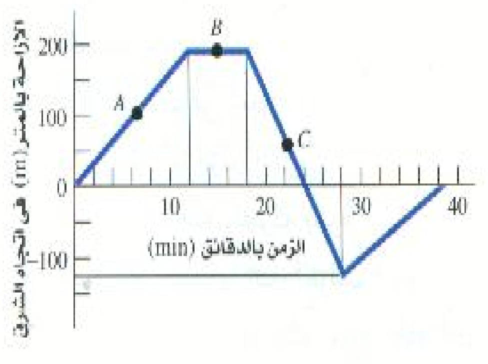
7 ـ يمثل الشكل م 2-2 حركة نملة فى خط مستقيم . أوجد السرعة المتوسطة للنملة أثناء الحركة (أ) من A إلى E ، (ب) من B إلى E ، (جـ) من C إلى E ، (د) من D إلى E ، (هـ) من C إلى D .

8 ـ يمثل الشكل م 2-2 حركة حشرة على سلك ممتد على استقامة المحور x . أوجد السرعة المتوسطة للحشرة أثناء الحركة (أ) من B إلى D ، (ب) من D إلى E ، (جـ) من A إلى D ، (د) من A إلى B .

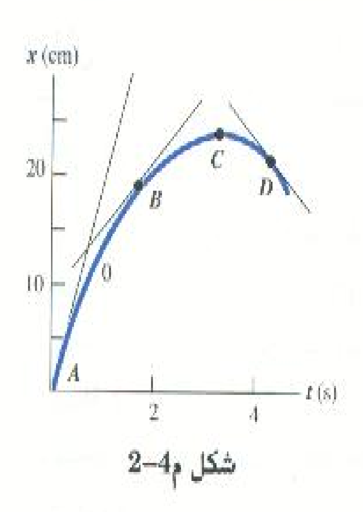
■ 9 ـ مارى تستطيع الجرى بمعدل حركة أقصاه 4.2 m/s بينما يجرى كيم بمعدل قدره 3.4 m/s ، وعليهما أن يتسابقا مسافة قدرها 200 m ابتداء من نفس النقطة . فإذا طلب منهما أن يصلا إلى نقطة النهاية فى نفس اللحظة ، فبأى زمن ينطلق كيم قبل مارى ؟

■ 10 ـ هناك خطة بديلة للموقف السابق وصفه فى المسألة 9 وهى أن ينطلق كيم فى نفس اللحظة مع مارى ، ولكن من نقطة تبعد عن مارى مسافة s . (لاحظ أن مارى تقطع المسافة 200 m كاملة) . ما قيمة s التى تجعل المتسابقين يصلان إلى النهاية معًا ؟

■ 11 ـ تمشى فتاة فى شارع فى اتجاه الشرق ، ويمثل المنحنى بالشكل م 3-2 إزاحتها ابتداء من منزلها . أوجد سرعتها المتوسطة خلال الفترة الزمنية المبينة بأكملها وسرعتها اللحظية عند النقط C ، B ، A .



شكل م3-2



شكل م4–2

12 ـ أوجد ما يلي بالنسبة للفتاة المشار إليها في المسألة 11 . (أ) السرعة المتوسطة خلال الفترة من $t = 7$ min إلى $t = 14$ min ؛ (ب) السرعة اللحظية عند $t = 13.5$ min ؛ (جـ) السرعة اللحظية عند $t = 23$ min .

13 ـ الشكل م 4–2 يمثل حركة جسيم على استقامة المحور x . أوجد السرعة المتوسطة خلال الفترة من A إلى C . أوجد أيضًا السرعة اللحظية عند D وعند A .

14 ـ أوجد السرعة المتوسطة أثناء الحركة من C إلى D والسرعة الحظية عند B وعند C وذلك لحركة الممثلة بيانيًا في الشكل م 4–2 .

15 ـ يبدأ كلبان الجري أحدهما تجاه الآخر من نقطتين المسافة بينهما 135 m ، وكان مقدار سرعة أحدهما 6.75 m/s ومقدار سرعة الآخر 5.25 m/s . ما بعد كل من الكلبين عن نقطة بدايته عندما يتقابلان ؟

16 ـ تسير شاحنة تجاه الشرق بسرعة قدرها 18.8 m/s . وفي لحظة معينة كانت الشاحنة متقدمة بمسافة قدرها 1.56 km عن سيارة تسير نحو الشرق بسرعة قدرها 25.5 m/s . ما الزمن اللازم لكي تلحق السيارة بالشاحنة بفرض أن مقداري السرعتين ثابتان ؟

الأقسام من 2–6 إلى 2–8

17 ـ تتسارع سيارة متحركة على طريق مستقيم من 2.18 m/s إلى 7.75 m/s خلال زمن قدره 5.77 s . ما قيمة العجلة المتوسطة للسيارة ؟

18 ـ تطير طائرة في خط مستقيم فتتغير سرعتها من 460 km/h إلى 325 km/h خلال 52.5 s . أوجد العجلة المتوسطة للطائرة بالوحدات m/s^2 .

19 ـ سيارة متحركة بسرعة قدرها 23.7 m/s . ضغط السائق على الفرامل حتى تتوقف السيارة بعد 10.8 s . أوجد العجلة المتوسطة للسيارة والمسافة المقطوعة قبل أن تسكن تمامًا .

20 ـ يدعي متسابق أنه يستطيع أن يعجل سيارته من السكون إلى 200 mi/h خلال 5.0 s . ما قيمة العجلة المتوسطة لهذه السيارة بالوحدات m/s^2 ؟ ما هي المسافة التي تقطعها السيارة خلال هذا الزمن ؟

21 ـ يدعي أحد المتسابقين أنه يستطيع قطع ربع الميل في زمن قدره 4.87 s بادئًا من السكون . ما قيمة العجلة المتوسطة لهذا المتسابق ؟ وما مقدار سرعة السيارة عند علامة ربع الميل ؟

22 ـ اصطدمت طلقة رصاص متحركة بسرعة قدرها 220 m/s بشجرة فاخترقتها مسافة 4.33 cm قبل توقفها . أوجد العجلة المتوسطة للرصاصة ، والزمن اللازم للتوقف .

23 ـ الإلكترونات في أنبوبة تليفزيون كالسابق ذكرها في المسألة 3 تتسارع من السكون إلى 1.25×10^8 m/s خلال مسافة قدرها 1.12 cm . ما الزمن اللازم لذلك ؟ وما قيمة العجلة المتوسطة للإلكترونات ؟

24 ـ تتباطئ شاحنة متحركة بسرعة قدرها 22.5 m/s بمعدل 2.27 m/s^2 . (أ) ما هو الزمن اللازم لتوقف السيارة ؟ ما المسافة التي تقطعها أثناء التوقف ؟ (جـ) ما المسافة المقطوعة خلال ثلث الثانية بعد الضغط على الفرامل ؟

25 ـ اخترقت رصاصة متحركة بمعدل 190 m/s قطعة خشب سمكها 2.54 cm وخرجت منها بمعدل حركة قدره 80 m/s . أوجد العجلة المتوسطة للرصاصة والزمن المار أثناء مرورها داخل الخشب .

▪ 26 ـ تتحرك كرة من المطاط بمعدل حركة قدره 31.5 s فتصطدم بحائط خرسانى وتنعكس إلى الخلف مباشرة بمعدل حركة قدره 28.5 m/s . بفرض أن التصادم مع الحائط يستغرق 0.15 s ، أوجد العجلة المتوسطة المؤثرة على الكرة أثناء التصادم .

▪ 27 ـ قاطرة تجر قطارًا طوله 580 m بما فيه القاطرة . تتسارع القاطرة بانتظام من السكون وتصل إلى تقاطع طرق يبعد 1.35 km عن نقطة البداية خلال 9.66 min . (أ) ما هو الزمن اللازم لوصول العربة الأخيرة إلى تقاطع الطرق بعد وصول القاطرة إليه ، بفرض أن القاطرة تحتفظ بعجلتها ثابتة ؟ (ب) ما سرعة القطار عندما تصل العربة الأخيرة إلى تقاطع الطرق ؟

▪ 28 ـ تغلق العربة الأولى لقطار ساكن تقاطع طرق . وعندما بدأ القطار فى الحركة لاحظ سائق سيارة منتظرة أن العربة الوحدة من القطار تستغرق 18.8 s لقطع مسافة تساوى طولها L . أوجد عجلة القطار بدلالة L . وبفرض أن العجلة ثابتة ، ما هو الزمن اللازم لكى تعبر أول 50 عربة من القطار سائق السيارة المنتظرة وذلك اعتبارًا من لحظة بداية القطار للحركة ؟

▪ 29 ـ تسير سيارة بمعدل 27 m/s فى طريق مواز لخط سكة حديدية . ما الزمن اللازم للسيارة لكى تعبر قطارا طوله 920 m وسرعته 18.3 m/s إذا كان القطار متحركا (أ) فى نفس اتجاه السيارة ؟ (ب) فى عكس اتجاهها ؟

▪ 30 ـ بدأت سيارة حركتها من السكون بعجلة قدرها 2.44 m/s . وفى نفس اللحظة عبر أتوبيس متحرك بمعدل ثابت قدره 19.6 m/s تلك السيارة فى حارة مرورية أخرى من الطريق . ما الزمن اللازم للسيارة لكى تلحق بالأتوبيس ؟ بأى سرعة تتحرك السيارة فى هذه اللحظة ؟ وما المسافة التى قطعتها السيارة حتى تلك اللحظة ؟

▪▪ 31 ـ سيارتان تتحرك كل منهما بمعدل 30.5 m/s إحداهما تجاه الأخرى فى نفس الحارة المرورية . وعندما أصبحت المسافة بينهما 250 m رأى كل من السائقين الآخر فبدءا فى التقاصر بنفس المعدل . ماذا يجب أن يكون مقدار هذا التقاصر حتى يتحاشى السائقان تصادم سيارتيهما بالكاد ؟

القسم 2-9

32 ـ وقع قالب طوب مخلخل من حافة نافذة ترتفع عن سطح الشارع بمقدار 21.3 m . ما سرعة القالب قبل ارتطامه بالشارع مباشرة ؟ ما الزمن اللازم مروره قبل وصول القالب إلى سطح الشارع ؟

33 وقعت فتاة من على لوح خشبى سميك فوق مجرى مائى فوصلت إلى الماء بعد 1.32 s . على أى ارتفاع يوجد اللوح الخشبى فوق سطح الماء ؟ ما سرعة الفتاة عند وصولها إلى سطح الماء ؟

▪ 34 ـ قذفت كرة بيسبول رأسيا إلى أعلى بسرعة ابتدائية قدرها 23.9 m/s . إلى أى ارتفاع تصل الكرة قبل أن تبدأ فى السقوط ؟ ما الزمن اللازم للكرة لكى تصل إلى أقصى ارتفاع ؟

▪ 35 ـ قذف حجر رأسيًا إلى أعلى من قمة مبنى ارتفاعه 26.0 m بسرعة ابتدائية مقدارها 18.6 m/s . ما هو الزمن اللازم لوصول الحجر إلى الأرض ؟ بأى سرعة يتحرك الحجر قبل ارتطامه بالأرض مباشرة ؟

▪ 36 ـ ضرب الضارب كرة البيسبول بالمضرب فتحركت رأسيًا إلى أعلى . وبعد 9.3 s من ضرب الكرة التقف لاعب آخر الكرة على نفس المستوى الذى تركت فيه الكرة المضرب . إلى أى ارتفاع وصلت الكرة ؟ بأى سرعة كانت الكرة تتحرك عند إمساكها ؟

▪ 37 ـ قذفت فتاة واقفة على سطح مبنى ارتفاعه 22 m قطعة عملة معدنية رأسيًا إلى أعلى بسرعة مقدارها 8.8 m/s . ما الزمن الذى تستغرقه قطعة العملة للوصول إلى الأرض ؟ ما سرعة قطعة العملة قبل اصطدامها بالأرض مباشرة ؟

▪ 38 ـ يجرى لص طوله 1.9 m بسرعة ثابتة قدرها 3.77 m/s فى ممر جانبى ، وتقع نافذة شقتك على ارتفاع 17.8 m من

هذا الممر . إذا أسقطت إناء زهور من السكون فأصاب راس اللص تحتك مباشرة ؛ فعلى أى مسافة بالنسبة إلى موضع نقطة الإصابة كان اللص فى لحظة إسقاطك لإناء الزهور ؟

■ 39 ـ أسقطت كرتان من ارتفاعين مختلفين . فإذا أسقطت إحدى الكرتين قبل الأخرى بزمن قدره 0.85 s ، ولكن الكرتين ارتطمتا بالأرض فى نفس اللحظة وذلك بعد إسقاط الكرة الأولى . من أى ارتفاع أسقطت كل من الكرتين ؟

■■ 40 ـ امرأة تستقل مصعدًا يتحرك إلى أعلى بمعدل حركة ثابت قدره 3.35 m/s . أسقطت المرأة قطعة عملة معدنية من ارتفاع قدره 1.25 m فوق مستوى أرضية المصعد . ما الزمن اللازم لاصطدام قطعة العملة بأرضية المصعد ؟

■■ 41 ـ كرر المسألة 40 إذا كان المصعد ساكنًا فى لحظة إسقاط قطعة العملة ، ولكنه متسارع رأسيًا إلى أعلى بمعدل قدره $3.5\ m/s^2$.

القسم 2-10

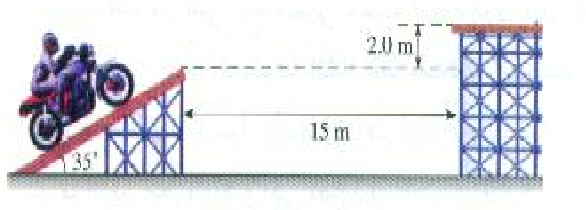
42 ـ تدحرجت بلية أفقيًا على سطح منضدة فوصلت إلى الحافة ثم وقعت على أرضية الحجرة . وعندما كانت هذه البلية عند الحافة تمامًا أسقطت من المنضدة كرة أخرى فإذا كان ارتفاع المنضدة 1.20 m ، فما المسافة الفاصلة بين نقطتى اصطدام الكرتين على الأرضية ؟ ما الفارق الزمنى بين اصطدامى الكرتين بالأرضية ؟

43 ـ خرطوم مطافئ يطلق الماء أفقيًا من قمة مبنى تجاه حائط يبعد عنه 31 m ، ويترك الماء فوهة الخرطوم بسرعة مقدارها 6.4 m/s . على أى مسافة تحت مستوى فوهة الخرطوم يصطدم الماء بالحائط ؟ (**تلميح : اعتبر الماء تيارًا من الجسيمات التى تترك الفوهة**) .

■ 44 ـ أطلقت « دانة مدفع آلى » فى سيرك بمعدل حركة قدره 24.4 m/s وكانت مسار ماسورة المدفع موجهة بزاوية 50° فوق الأفقى . (أ) على أى مسافة (أفقية) بالنسبة لفوهة المدفع يجب وضع الشبكة المخصصة لالتقاط الشخص ؟ (ب) ما زمن طيران الشخص ؟ افترض أن فوهة المدفع والشبكة على نفس المستوى .

■■ 45 ـ افترض أنك أطلقت مقذوفًا بزاوية قدرها 35° فوق الأفقى بسرعة ابتدائية قدرها 200 m/s ، وأن المقذوف قد هبط فى واد يقع على بعد 300 m تحت مستوى نقطة الإطلاق . ما مدى المقذوف وما زمن طيرانه ؟

■■ 46 ـ يريد سائق بهلوان كالبين بالشكل م 5-2 أن يثب بدراجته النارية من المنحدر والهبوط على المنصة . بأى سرعة يجب أن تكون الدراجة البخارية متحركة فى لحظة تركها لمنصة حتى تنجح اللعبة ؟



شكل م 5-2

القسم 2-11

■ 47 ـ طائرة هليوكوبتر موجهة تجاه الشمال . تستطيع هذه الطائرة أن تطير فى الهواء الساكن بمعدل قدره 75 mi/h ، وكانت الرياح تهب من الاتجاه الشمالى الشرقى بسرعة قدرها 20 mi/h . ما قيمة سرعة الطائرة بالنسبة إلى الأرض ؟ ما المسافة التى تقطعها الهليوكوبتر فى 20 min ؟

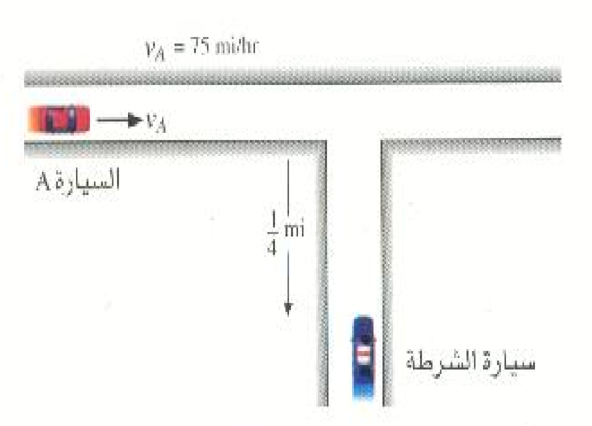
■ 48 ـ لنفرض أنك تريد أن تعبر نهرًا فى قارب إلى النقطة التى تقع أمامك مباشرة على الضفة الأخرى ، وأن مقدار سرعة التيار فى النهر 0.85 m/s . فإذا علمت أن تجديفك يعطى القارب سرعة مقدارها 2.1 m/s ؛ (أ) فى أى اتجاه يجب توجيه القارب حتى تصل إلى النقطة المقابلة تمامًا على الضفة الأخرى ؟ (ب) إذا كان عرض النهر 45 m ، فما الزمن الذى تستغرقه فى العبور ؟

■ 49 ـ طائرة يمكنها الطيران فى الهواء الساكن بسرعة مقدارها 650 km/h . وجهت الطائرة بزاوية قدرها $25°$ غرب الشمال ، ولكن لاحظ الطيار أنها تطير بالفعل بزاوية قدرها $18°$ غرب الشمال . ما سرعة الرياح المتجه شرقًا والتى تسبب هذا الانحراف ؟

مسائل عامة

■ 50 ـ افترض أنك تقود سيارتك فى طريق سريع بمعدل 95 ft/s متتبعًا سيارة تسير بنفس معدل الحركة ، وكان أقصى تقاصر ممكن للسيارتين $22.7\ ft/s^2$. وفجأة ضغط سائق السيارة التى أمامك على الفرامل بقوة لإيقافها بأسرع ما يمكن ، واستغرقت استجابتك زمنا قدره 0.40 s قبل قيامك بالضغط القوى على فراملك لتقف بأسرع ما يمكن أيضًا . ما أصغر مسافة بين السيارتين كى لا يحدث التصادم ؟

■ 51 ـ تقف سيارة شرطة على بعد قدره ربع الميل من طريق سريع رئيسى . تلقى رجل الشرطة تقريرًا عن سيارة متحركة فى الطريق السريع بمعدل قدره 75.0 m/h ، و هذا موضح بالشكل م 6-2 . فإذا كانت أقصى عجلة لسيارة الشرطة 28.0 ft/s ، فعلى أى بعد من التقاطع يجب أن تكون السيارة إذا أراد رجل الشرطة الوصول إلى التقاطع قبل السيارة بزمن قدره 30 s ؟



شكل م 6-2

■■ 52 ـ اقترح طالب فيزياء طريقة لقياس ارتفاع مبنى باستخدام ساعة إيقاف لقياس الزمن اللازم لقطعة من الرصاص تم إسقاطها من قمة المبنى كى تقطع آخر 1.5 m قبل الارتطام بالأرض . وقد وجد أن قطعة الرصاص تستغرق 0.109 s فى قطع آخر 1.5 m من مبنى معين . ما ارتفاع هذا المبنى ؟

■■ 53 ـ قذفت كرة رأسيًا إلى أعلى بسرعة مقدارها v_0 من نقطة ترتفع مسافة h m فوق سطح الأرض . أثبت أن الزمن اللازم لوصول الكرة إلى الأرض يعطى بالمقدار :

$$\frac{v_0}{g}\left(1+\sqrt{1+\frac{2hg}{v_0^2}}\right)$$

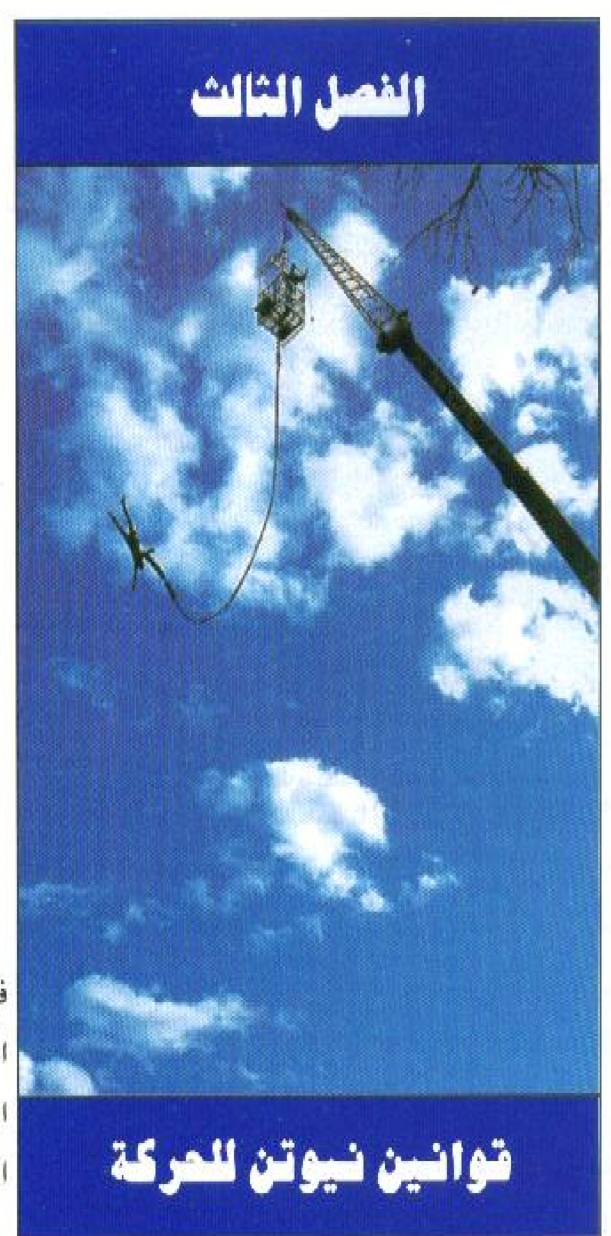
■■ 54 ـ تتحرك عربة قطار أفقيًا بسرعة مقدارها 24 m/s وتقاصر قدره $3.65\ m/s^2$ وفى هذه اللحظة سقط مصباح كهربائى من ارتفاع قدره 2.55 m ووصل إلى أرضية العربة . فى أى نقطة يرتطم المصباح بالأرضية بالنسبة إلى النقطة الواقعة تحت الموضع الأصلى مباشرة ؟

■ 55 ـ أسقطت قطعة من الرصاص من السكون فى بركة ماء من منصة ترتفع عن سطح الماء بمقدار 10 m . وعندما وصلت إلى سطح الماء قلت سرعتها إلى عُشر قيمتها التى اكتسبتها قبل الارتطام بالماء مباشرة ، ثم غاصت بهذه السرعة الجديد الصغيرة فوصلت إلى قاع البحيرة بعد 6.5 s من لحظة وصولها إلى سطح الماء . ما عمق البحيرة ؟

■■ 56 ـ عندما كنت واقفًا على منصة مشاهدة ارتفاعها 100 m فوق سطح شارع فى مدينة قمت بإسقاط حجر من السكون . وفى نفس لحظة إسقاط الحجر قام صديق واقف فى الشارع تحتك مباشرة بقذف حجر رأسيًا إلى أعلى بسرعة ابتدائية قدرها 50 m/s . بفرض أن الحجرين يتحركان على استقامة نفس الخط المستقيم الرأسى وأن مقاومة الهواء مهملة ،

احسب : (أ) على أى ارتفاع يتصادم الحجران ؟ (ب) متى يتصادم الحجران ؟ (جـ) هل يحدث التصادم عندما يكون حجر صديقك صاعدًا أم هابطًا ؟

57 ـ افترض أن لديك سيارة سباق أقصى عجلة (تسارع) لها $a = 24\ ft/s^2$ وأقصى تقاصر لها عند الفرملة $a = -32\ ft/s^2$. فإذا طلب منك أن تبدأ من السكون ثم تقطع مسافة قدرها $\frac{1}{4}$ mi ثم تقف عند علامة ربع الميل بالضبط بحيث تتسارع بأكبر قدر ممكن خلال جزء من ربع الميل ثم تلى ذلك بأقصى تقاصر إلى أن تتوقف نهائيًا . ما الزمن الذى يتم فيه ذلك ؟



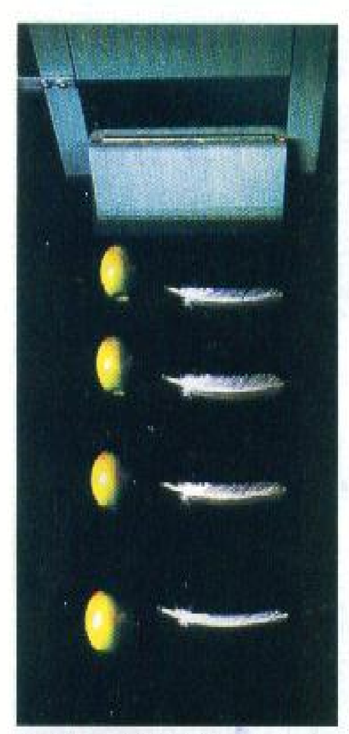
في الفصل الثانى قمنا بتعريف ومناقشة السرعة والعجلة دون التعرض لأسباب حركة الأجسام . وسنتعرض الآن لكيفية تولد العجلة نتيجة للقوة ، وخلال ذلك سنذكر ونناقش قوانين نيوتن الثلاثة للحركة ، وهى قوانين ذات أهمية أساسية فى الفيزياء .

3-1 اكتشاف القوانين الفيزيائية

يرتبط منشأ الطريقة العلمية أساسًا بشخصين اثنين هما جاليليو جاليلي واسحق نيوتن . وبالرغم من اضطرار جاليليو إلى استخدام أجهزة ذات ضباطة محدودة جدا فإنه من أوائل من أصروا على أن الطبيعة يمكن فهمها من خلال التجارب المحكمة الدقيقة . وفى بدايات القرن السابع عشر طور جاليليو مفهوم **القصور الذاتي** وأعطى أول وصف صحيح لتسارع الأجسام الساقطة بالقرب من سطح الأرض . وقد تناقضت نتائجه فى كلا هذين الاكتشافين مع أفكار الفيلسوف الإغريقى أرسطو (عام 350 قبل الميلاد تقريبًا) ، والتى كان معاصرو جاليليو يؤمنون بصحتها إيمانًا مطلقًا . ونحن نرى من الأهمية بمكان فى هذا الصدد أن نقارن بين الفكرتين المتنافستين فى كل حالة لنوضح طبيعة التفكير العلمى والقانون الفيزيائى بالأمثلة .

القصور الذاتى

يرى أرسطو أن السكون هو الحالة « الطبيعية » لأى جسم : فإذا وضع أى جسم فى



سقوط تفاحة وريشة فى غرفة مفرغة . عند إهمال مقاومة الهواء تسقط جميع الأجسام بنفس العجلة

حالة حركة فإنه يصل إلى السكون « طبيعيًا » . وقد ظلت هذه الظاهرة بمثابة قاعدة أساسية للطبيعة حتى زمن جاليليو . ولكن جاليليو أكد أنه إذا وصل جسم متحرك إلى السكون فإن ذلك يحدث دائمًا بسبب « قوة » ما كالاحتكاك الذى يعيق الحركة ويوقف الجسم فى نهاية الأمر . كذلك أشار جاليليو إلى أنه كلما كانت القوة المعوقة صغيرة كلما استغرق الجسم وقتًا أطول حتى يصل إلى السكون . ومع أن طبيعة القوة المعوقة يمكن أن تختلف من حالة إلى أخرى إلا أن جاليليو لم يتوصل إلى تعميم مفيد بشأنها . ومع ذلك فإن جاليليو بعبقريته الفذة استنتج منطقيًا أنه إذا لم تؤثر على الجسم **أى** قوة معوقة فإنه **يستمر فى الحركة إلى الأبد** . وقد أطلق جاليليو على ميل الأجسام المتحركة للاستمرار فى الحركة **مبدأ القصور الذاتى** . وسنرى فى القسم 3-2 أن نيوتن قد وصف القصور الذاتى بعد ذلك وصفًا أكثر منهجية يحتوى الأجسام الساكنة بالإضافة إلى المتحركة .

الأجسام الساقطة

من بين آراء أرسطو المشهورة أن الأجسام الثقيلة تسقط إلى الأرض أسرع من الأجسام الخفيفة . وقد رأينا فى القسم 9-2 أن جاليليو كان يؤمن إيمانًا راسخًا بأن كل الأجسام تتسارع بنفس المعدل ، وأنها تصل إلى الأرض فى نفس الزمن إذا أسقطت من نفس الارتفاع .

ليس من السهل علينا أن نحدد هنا صحة أى هذين الرأيين لأننا نرى (عادة) أن الأجسام الثقيلة تسقط أسرع من الخفيفة ، وتعتبر قنبلة المدفع وريشة الطائر مثالاً جيدًا لذلك . علاوة على هذا فإن جسمًا معينًا غير منتظم الشكل ـ الطائر الغواص مثلاً ـ يمكن أن يسقط بسرعات مختلفة ، ويتوقف ذلك على ما إذا كان فاردًا جناحيه أو طاويًا لهما . وقد لخص جاليليو هذه النقطة فى أن العامل الحاسم فى الطريقة التى تسقط بها الأجسام هو مدى تأثرها بالاحتكاك بالهواء . ذلك أن هذا الاحتكاك يغطى ويحجب الحقيقة . « تخلص من الهواء » ، هكذا فكر جاليليو ، عندئذ تكتشف **المبدأ الأساسى** الذى يحكم سلوك الأجسام الساقطة وهو أن العجلة واحدة وثابتة لجميع الأجسام . هذا ما درسناه فى القسم 2-9 .

بهذه الطريقة استطاع جاليليو فى هذين الخلافين الكبيرين ، بأخذ التأثيرات الثانوية التى تحجب السلوك السهل للطبيعة ، أن يستخلص أكثر القوانين أساسية وعمومية . وهذا النوع من توحيد النظرة المتبصرة صفة مميزة أساسية للطريقة العلمية .

ويعود الفضل الأول فى وضع الأساس الرياضى الحقيقى للقانون الفيزيائى إلى اسحق نيوتن (1642 – 1727) . فقوانين نيوتن للحركة ، التى ندرسها فى هذا الفصل ، هى صيغ رياضية فى غاية البساطة ، ومع ذلك فهى تمثل قدرًا عظيمًا من العمومية وتنطبق على جميع الحالات الخاصة بالأجسام المتحركة (ما عدا حالة الحركة بسرعات كبيرة جدًا التى تخضع لمعادلات قام أينشتين باستنتاجها من معادلات نيوتن) . كذلك يعود الفضل لنيوتن فى وضع النظرية العامة للجاذبية ، وهو ما سنتعرض له فى الفصل السابع . وفى إطار هذه النظرية يمكن فهم كثير من الظواهر ، كالمقذوفات المتحركة بالقرب من سطح الأرض ومدارات الكواكب حول الشمس ، باعتبارها أمثلة لمبدأ واحد .

3-2 مفهوم القوة وقانون نيوتن الأول للحركة

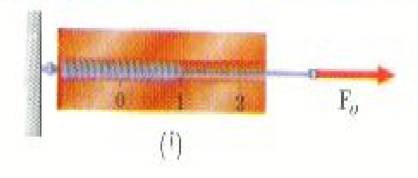
نبدأ دراستنا لأعمال اسحق نيوتن بمناقشة **قوانين الحركة** الثلاثة ، والتي نشرت لأول مرة في خلاصة كلاسيكية بعنوان « المبادئ الأساسية للفلسفة الطبيعية* » . وقد قام نيوتن في هذا العمل بتقديم مفهومي **الكتلة والقوة** وربط هذين المفهومين بعجلة الأجسام . لنبدأ بمناقشة القوى أولاً ، أما مفهوم الكتلة فسوف نعالجه عند مناقشة قانون نيوتن الثاني .

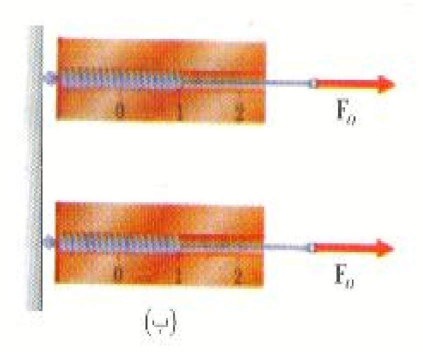
لدينا جميعًا فكرة عامة ، وإن كانت غامضة ، عن القوى إذ نتعرض للكثير من الدفع والشد في حياتنا اليومية . كما إننا ندرك أن الأرض تؤثر على الأجسام بقوة نسميها **الجاذبية** ، وأننا يجب أن نؤثر بقوة معينة على جسم نريد رفعه ضد الجاذبية . ونعلم من خبرتنا أيضًا أن القوى لها اتجاهات ، فهي إذن كميات **متجهة** . وقد تؤثر قوى كثيرة على جسم في اتجاهات مختلفة في نفس الوقت . وإحدى طرق التأثير بقوة معينة على جسم ما هي أن يربط هذا الجسم في طرف زنبرك ثم يشد الطرف الآخر ، وسوف نستخدم هذا المثال البسيط لتوضيح كيف يمكن تعريف مقدار عياري للقوة . إذا كان الزنبرك يحمل مؤشرًا (شكل 1-3 أ) فإن المؤشر سيبين مقدارًا معينًا من استطالة الزنبرك ، وبالتالي مقدارًا معينًا من القوة التي يؤثر به الزنبرك على الجسم . معنى ذلك أن هذا القدر من الاستطالة يناظر دائمًا نفس القدر من القوة . ومن ثم يمكن استخدام هذا المقدار الاعتباطي من الاستطالة كدلالة لكمية عيارية من القوة التي يؤثر بها الزنبرك .

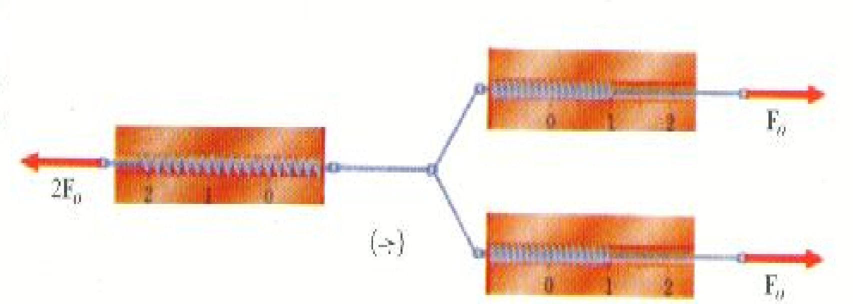
ولمضاعفة هذه القوة العيارية مرتين أو ثلاث علينا فقط ربط الجسم في زنبركين متماثلين أو ثلاثة وشدها حتى تصل إلى نفس الاستطالة العيارية ، وهذا مبين بالشكل 1-3 ب . ويمكننا أيضًا ملاحظة أنه إذا ربط الجسم في اثنين من هذه الزنبركات متصلين بزنبرك مماثل ثالث ثم قمنا بشد الزنبركين الأولين إلى نفس الاستطالة العيارية سنجد أن استطالة الثالث تساوي ضعف الاستطالة العيارية (شكل 1-3 جـ) . وبتكرار هذه التجربة باستخدام ثلاثة زنبركات متصلة بزنبرك واحد سنجد أن استطالة الزنبرك الفردي تساوي ثلاثة أضعاف الاستطالة العيارية . وبناء على ذلك يمكننا استنتاج أن مقدار القوة التي يؤثر بها زنبرك واحد تتناسب طرديًا مع مقدار الاستطالة ، وبالتالي يمكن **معايرة** تدريج للزنبرك يبين مضاعفات القوة العيارية . من هذا نرى أنه حتى بدون تعريف وحدة معينة للقوة فقد تمكنا من التعرف على طريقة للتأثير على الجسم بقوى يمكن قياسها وذلك باستخدام مثل هذه الزنبركات .

ويبين الجدول 1-3 بعض أنواع القوى التي نقابلها في حياتنا اليومية ، وسوف نتناول بالمناقشة بعض تطبيقات هذه القوة بشيء من التفصيل في أقسام لاحقة .

* Principia Mathematica Philosophiae Naturalis.







شكل 1-3 :
(أ) F_0 مقدار القوة اللازمة لإطالة زنبرك بمقدار معين ، وليكن 1 cm .
(ب) زنبركان مماثلان للزنبرك السابق . استطالة كل منهما بمقدار 1 cm تنتج قوة مؤثرة على الحائط قدرها $2\ F_0$.
(جـ) القوة $2\ F_0$ تسبب استطالة للزنبرك الفردى قدرها ضعف استطالة كل من الزنبركين . وهكذا فإن الزنبرك الواحد يولد قوة قدرها F_0 و $2\ F_0$ و $3\ F_0$ عندما يستطيل بمقدار 1 cm ، 2 cm ، 3 cm على الترتيب .

جدول 1-3 : بعض أنواع القوى المعروفة

النوع	أمثلة
قوى الشد	القوى التى تشد أجسامًا مربوطة فى أسلاك أو كابلات أو جبال وما إلى ذلك .
قوى الانضغاط	قوى تتضمن أجسامًا جاسئة* تحمل أوزانًا (الرفوف والأرضيات والمنصات .. إلخ)
	قوى ناتجة عن ضغط السوائل .
	قوى ناتجة عند تصادم الأجسام الصلبة .
	قوى عمودية على مساحات أسطح التلامس عند دفع جسمين صلبين معًا .
قوى الاحتكاك أو اللزوجة	قوى تقاوم الحركة الانزلاقية بين سطحين متلامسين وهى موازية للسطح .
القوة الأساسية المؤثرة بين أجسام متباعدة فى الفراغ	قوى التجاذب بين كل الأجسام المادية .
	القوة الكهربائية بين أجسام تحمل شحنة كهربائية .
	القوى المغناطيسية بين التيارات الكهربائية .

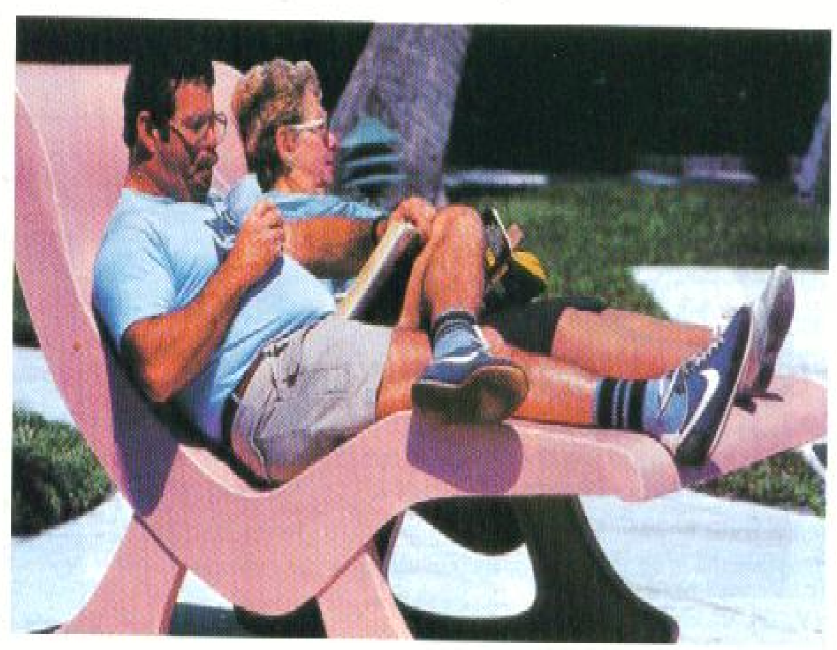
تستخدم الأسلاك لرفع الأجسام بواسطة قوى الشد .

* تكون الأجسام جاسئة أو صلبة بسبب القوى المتبادلة بين الذرات أو الجزيئات المكونة للجسم . هذه القوى ذات طبيعة كهربائية أساس . وعندما نتكلم عن قوى الشد أو الضغط فإننا نعنى مواقف تكون فيها القوى بين ذرات أو جزيئات مادة الجسم ، كالحبل أو سطح المنضدة ، كبيرة بحيث تستطيع الأجسام التأثير بهذه القوى دون أن تنكسر .

يختص قانون نيوتن الأول للحركة بالمواقف التى تكون فيها القوة المحصلة المؤثرة على جسم ما صفرًا . هذا يعنى أنه قد يكون الجسم واقعًا تحت تأثير عدد من القوى ، ولكن **المجموع الاتجاهى** لهذه القوى يساوى صفرًا ؛ يقال عندئذ أن **صافى القوة** يساوى الصفر فى هذه الحالة . فإذا كان الجسم فى حالة السكون ، يمكن كتابة نص قانون نيوتن على الصورة :

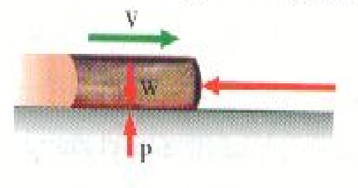
يظل الجسم فى حالة السكون إذا كانت القوة المحصلة المؤثرة عليه صفرًا .

والكثير من أمثال هذه المواقف مألوف لنا فى الحياة . فالكتاب الموضوع على المنضدة ساكن لأن قوة شد الجاذبية المؤثرة عليه إلى أسفل متزنة مع قوة مساوية تؤثر بها المنضدة على الكتاب إلى أعلى . وفى لعبة شد الحبال يظل العلم ثابتًا فى المنتصف إذا كان الحبل مشدودًا فى كلا الجانبين بقوتين متساويتين ومتضادتين . وقد نتساءل لماذا نضع نيوتن فى مثل هذه المنزلة العالية لتوصله لهذا الاستنتاج الواضح . الواقع أننا نفعل ذلك جزئيًا لأن القانون الأول ينطبق أيضًا على الأجسام المتحركة ، ولكن بطريقة أقل وضوحًا بدرجة كبيرة .



أجسام فى حالة السكون

وفى تحليل نيوتن لمشاهدات جاليليو عن الأجسام المتحركة (القسم 1-3) كان أسلوب تفكيره كما يأتى . بالنسبة للكتاب الموضوع على المنضدة ؛ صافى القوة المؤثرة عليه يساوى الصفر . وكما ذكرنا سابقًا فإن مجموع القوى المؤثرة عليه فى الاتجاه الرأسى يساوى صفرًا . فإذا ما أعطى الكتاب دفعة أفقية ليتحرك فى هذا الاتجاه لن يتغير شىء فى الاتجاه الرأسى ، فسوف تظل القوى الرأسية متزنة . ولكننا نلاحظ أن الكتاب يصل إلى السكون بعد أن يقطع مسافة معينة على المنضدة . وتأييدًا لما لخصه جاليليو سابقًا قرر نيوتن أن هناك قوة أفقية غير متزنة تؤثر على الكتاب فتعوق حركته وتسبب توقفه (انظر الشكل 2-3) . فإذا جعلنا السطح أكثر نعومة ، وقللنا قوة الاحتكاك بالتالى ، فإن الكتاب سوف ينزلق مسافة أكبر قبل التوقف . لهذا استنتج نيوتن أنه فى غياب صافى هذا لن يتباطأ الكتاب إطلاقًا .



شكل 2-3 :
بسبب الاحتكاك تباطؤ الجسم إلى أن يتوقف تمامًا .

وبالرغم من استحالة التخلص من الاحتكاك كليًا فى الممارسات اليومية فقد استطاع نيوتن وجاليليو كلاهما وضع تصور **مثالى** للمواقف الفعلية . فبالسؤال « **ماذا يحدث إذا لم يكن الاحتكاك موجودا ؟** » استطاع هذان العالمان التوصل إلى المبدأ الأساسى للحركة ، والمختفى وراء التعقيدات الناشئة عن الاحتكاك . وقد استنتج نيوتن كذلك أنه لكى ينحرف جسم متحرك عن اتجاه حركته يجب أن تؤثر عليه قوة غير متزنة فى اتجاه الانحراف . ويمكن تلخيص هذين الاستنتاجين فى شكل أكثر عمومية على صورة قانون نيوتن الأول :

يستمر الجسم المتحرك فى الحركة بسرعة ثابتة إذا كان المجموع الاتجاهى للقوى الخارجية المؤثرة على الجسم صفرًا .

لاحظ أننا استخدمنا كلمة **سرعة** وليس **معدل الحركة** . هذا القانون ينص على أن مقدار سرعة الجسم واتجاهه لن يتغيرا ، بمعنى أن الجسم سوف يستمر فى الحركة فى خط مستقيم . ومن الطبيعى أن هذا العبارة صحيحة عند $v = 0$ وعندما تكون v مساوية لأى قيمة أخرى .

3-3 القصور الذاتى والكتلة

يرتبط مفهوم القصور الذاتى الذى قابلناه فى القسم 3-1 ارتباطًا وثيقًا بالقانون الأول . والتعريف الشائع لهذا المصطلح كما يلى :

القصور الذاتى هو ميل الجسم الساكن إلى الاستمرار فى السكون وميل الجسم المتحرك للاستمرار فى الحركة بسرعته الأصلية .



شكل 3-3 :
أسطوانة البلاتين ـ إيريديوم الموضحة هنا هى نسخة كتلة الجرام المعيارى ، وهى محفوظة فى المكتب القومى للمقاييس المعيارية بالولايات المتحدة الأمريكية المسئول عن حفظ هذا المقياس المعيارى الثانوى للكتلة . (المعهد القومى للمقاييس المعيارية) .

لدينا خبرة كبيرة فيما يختص بالقصور الذاتى . فنحن نعلم مثلاً أن القصور الذاتى لشاحنة محملة بالأسمنت أكبر كثيرًا من عربة الأطفال ، إذ أن تحريك عربة الأطفال أسهل كثيرًا من الشاحنة ، كما أن إيقاف عربة الأطفال أسهل كثيرًا من إيقاف الشاحنة إذا كانتا متحركتين بنفس السرعة . هذا يعنى أن تغيير حالة حركة جسم تكون صعبة عندما يكون قصوره الذاتى كبيرًا .

ولكى نجعل القصور الذاتى مفهومًا كميًا سنعرف كمية جديدة تسمى الكتلة ، وتعريفها فى نظام الوحدات SI كما يأتى . تسمى وحدة الكتلة فى هذا النظام بالكيلو جرام (kg) ، وهى كتلة أسطوانة معدنية محفوظة بعناية بالقرب من باريس بفرنسا . (يمثل شكل 3-3 نسخة من الكيلو جرام المعيارى وهى محفوظة فى المكتب القومى للمقاييس المعيارية بواشنطون ، دى سى) . وبالتعريف ، فإن جسمًا ذى قصور ذاتى مساو للقصور الذاتى للكيلو جرام المعيارى تكون كتلته 1 kg . وبالمثل ، إذا كان القصور الذاتى لجسم ما ثلاثة أضعاف هذه القيمة تعرف كتلته بأنها 3 kg ، وهكذا . هذا وسنرى عند دراسة قانون نيوتن الثانى كيف تدخل كتلة الجسم فى تحديد رد فعل الجسم تحت تأثير قوة محصلة **لا تساوى الصفر** .

الفيزيائيون يعملون ألان لايتمان معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا



حوالى عام 1980 مررت بتجربة وجدانية عظيمة في غرفة صغيرة بمنزلى فى ولاية ماسا تشوستس حيث كنت أعانى خلال حوالى ستة أشهر لحل مسألة فى الفيزياء النظرية . هذه المسألة كالتالى : ضع بعض البروتونات والإلكترونات فى إناء كروى ذى حجم معين وعند درجة حرارة معينة . فى هذه الظروف ستتحرك تلك الجسيمات فى جميع الاتجاهات محدثة أزيزًا متصلاً ، وإذا كانت درجة الحرارة عالية جدًا قد تتخلق جسيمات جديدة من طاقة الحركة . والسؤال هو : ما عدد هذه الجسيمات الجديدة ؟ إن الإجابة عن هذا السؤال قد يكون لها علاقة بسلوك الثقوب السوداء . كانت أدواتى الوحيدة فى هذا الصراع كومًا عاليًا من الورق الأبيض وسلة مهملات استعملتها كثيرًا .

وأخيرًا أدركت أن مسألتى ليست جوهرية وأنها لن توصلنى إلى اكتشاف قانون جديد من قوانين الطبيعة . ولكنى كنت أواجه مسألة لم يسبق حلها ووجدت أن اعتمادى على نفسى فى اكتشاف حقيقة ما ، مهما كانت صغيرة ، شيئًا مثيرًا . إن حياتى مليئة بمسلمات كثيرة ، فقد أخبرت أننى كنت ذات يوم فى حجم حبة الخردل ، وأخبرت أن الأرض ليست منبسطة كما يبدو ولكنها منحنية على نفسها فى شكل كرة كبيرة . وأنا أفهم تمامًا أننى يجب أن أثق فى معظم ما أعرفه من الآخرين ، فأى إنسان مهما كان لا يمكنه التحقق من صحة جميع الحقائق التى يؤمن بها هذا أو ذاك ، لكن كل حقيقة غير مؤكدة لا تتطلب ثمنًا كبيرًا . وشيئًا فشيئًا أخذت تلك العقيدة تتزعزع فى نفسى ، وعلى العكس فإنى رأيت أنه لا شيء يبنى الحقيقة إلا أن تكتشفها بنفسك من البداية ودون اقتفاء أثر الآخرين . وهكذا انتعشت فى نفسى مسألة الجسيمات فى الوعاء الكروى وكنت أحمل حساباتى معى دائمًا كما لو كانت خطابات من محبوبتى .

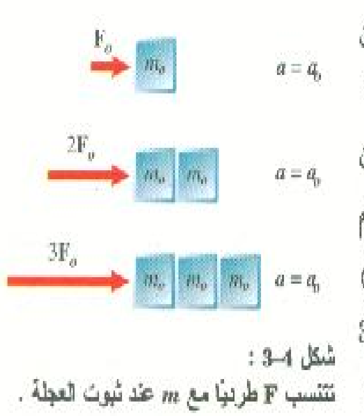
وفى فجر أحد الأيام استيقظت بشعور غريب وذهبت إلى مكتبى ، لقد وجدت فجأة أنه يمكننى مواصلة حل المسألة إلى النهاية . لا أعلم كيف وجدت طريقى ، ولكنه لم يكن أبدًا بالانتقال من معادلة إلى أخرى . كان عقلى الباطن يدرس المسألة بطريقة أخرى ، طريقة متسقة فى بنائها ونظيفة كالدولار الجديد .

من الصعب على أن أصف إحساس الفرح فى عمل إبداعى عندما يحتل كل شيء مكانه الصحيح فجأة . هذا يشبه فى الكثير قيادة قارب ذى قاع دائرى فى ريح شديدة . ذلك أن جسم القارب يكون عادة منغمرًا فى الماء بحيث يسبب الاحتكاك تقليل سرعة القارب بدرجة كبيرة . ولكن فى الريح الشديد يرتفع جسم القارب من آن إلى آخر خارج الماء ويقل الاحتكاك لحظيًا إلى ما يقرب الصفر ، كما لو أن يدًا عملاقة تشد القارب إلى أعلى بحيث تنزلق على الماء ، وهذا ما يسمى « الاستواء » .

لقد « استويت » فى ذلك الصباح الباكر وفى بضعة مرات أخرى فى حياتى المهنية . هذه اللحظة السامية السريعة للاكتشاف تساوى كل شهور الإحباط والفشل . ولفترة ما ستكون أنت المكتشف الشخصى الوحيد فى العالم الذى يعرف هذا الشيء الجديد ، ثم تسارع إلى مكتبك لتخبر زملاءك أنك ستقوم بنشر نتائجك . لكنك خلال تلك اللحظات القصيرة التى تعلم فيها حقيقة لا يعلمها أحد غيرك ستكون ذا قوة هائلة ، ويتحول شعورك بالتميز الذى كنت تحسه وأنت فتى يافع إلى حقيقة مجسدة ككوب القهوة الذى تحمله فى يدك .

3-4 قانون نيوتن الثاني

إننا نعلم من خبرتنا أن تغيير مقدار أو اتجاه حركة جسم ثقيل أكثر صعوبة من الجسم الخفيف . وللتعبير عن هذه الخبرة فى صورة كمية يمكننا إجراء التجربة الموضحة تخطيطيًا فى الشكل 4-3 . وقد رأينا فى القسم 2-3 كيف يقاس مقدار معيارى معين للقوة باستخدام الزنبرك المدرج ، لنفرض أن هذه القوة المعيارية F_0 . لنعتبر أن الأجسام المستعملة فى التجربة متماثلة الشكل ومتساوية الكتلة (كتلة كل منها 1 kg مثلاً) وأنها تطفو بدون احتكاك على منضدة هوائية على سبيل المثال . واضح من الشكل 4-3 أنه للحصول على نفس العجلة a_0 يجب أن يزداد صافى القوى المؤثرة F_{net} فى تناسب طردى مع تزايد الكتلة . يمكننا إذن استنتاج أن :



شكل 4-3 :
تتنسب F طرديًا مع m عند ثبوت العجلة .

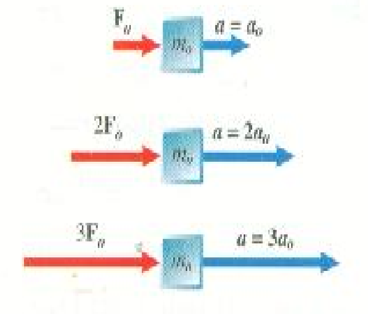
$$F_{net} \sim \text{mass}$$

عند ثبوت العجلة (يقرأ الرمز ~ هكذا « تتناسب مع ») .



تتسارع الزلاجة تحت تأثير القوى التى يؤثر بها الفريق عليها .

يمثل الشكل 5-3 صورة محورة من هذه التجربة حيث تؤدى زيادة صافى القوة F_{net} المؤثرة على نفس الكتلة m_0 إلى زيادة العجلة . وواضح من الشكل أن العجلة تتناسب طرديًا مع صافى القوة عند ثبوت الكتلة ، أى أن :



شكل 5-3 :
تتناسب F طرديًا مع a عند ثبوت العجلة .

$$F_{net} \sim a$$

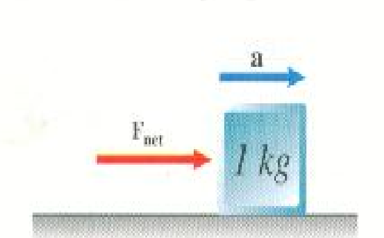
ويلاحظ كذلك أن العجلة فى نفس اتجاه صافى القوة .

بناء على ذلك يمكن توحيد هاتين النتيجتين فى معادلة واحدة على الصورة :

$$\mathbf{F}_{net} = km\mathbf{a} \qquad (3-1 \text{ أ})$$

حيث k ثابت التناسب .

هذه النتيجة البسيطة تعرف **بقانون نيوتن الثانى للحركة** ، وبالرغم من بساطتها فإنها صيغة عامة تنطبق على جميع أنواع القوى وجميع أنواع الأجسام . ذلك أنها تختزل تعقيدات القوى المختلفة والأجسام المتنوعة إلى الخواص الأساسية التى تتحدد بها الحركة فى جميع الحالات الممكنة مقادير القوة والكتلة التى يمكن قياسها . وبهذه الطريقة يوحد قانون نيوتن الثانى مدى واسعًا للغاية من المواقف فى إطار عمل عام ، ومن ثم فإنه يعتبر قانونًا فيزيائيًا أساسيًا .



شكل 3-6 :
صافى قوة قدره 1 N يعطى كتلة قدرها 1 kg عجلة مقدارها 1 m/s^2 .

ننتقل الآن إلى إيجاد قيمة ثابت التناسب بوضع التعريف المناسب لوحدة القوة . وسوف نعرف الوحدة الأساسية للقوة فى نظام الوحدات SI بأنه ذلك المقدار من صافى القوة الذى إذا أثر على كتلة قدرها 1 kg أكسبها عجلة قدرها 1 m/s^2 (شكل 3-6) . وإذا كان التعريف يبدو لنا تعريفًا اختياريًا فإنه كذلك بالفعل . فنحن لنا مطلق الحرية فى تعريف وحدة القوة بأى طريقة نريد ، ولكننا لسنا أحرارًا فى اختراع الطريقة التى تربط القوة بالعجلة . بهذا التعريف لوحدة القوة ، نجد أن ثابت التناسب فى المعادلة (3-1 أ) يساوى الوحدة ببساطة (أى قيمته 1) . وقد أطلق على هذا المقدار من القوة **1 نيوتن** (N) . الآن يمكننا إعادة تعريف القوة بشكل كمى أكثر كما يلى :


صافى القوة الذى مقداره نيوتن واحد هو تلك القوة التى تعطى كتلة قدرها كيلو جرام واحد عجلة قدرها متر واحد فى الثانية لكل ثانية .

ويعتبر النيوتن مثالاً لإحدى وحدات القياس **المشتقة** . ومن العلاقة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ نجد أن :

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg.m/s}^2 \;{}^{*}$$

وبالرغم من أن النيوتن هو وحدة القوة فى النظام SI فكثيرًا ما تستخدم وحدتان أخريان هما **الداين** والرطل أو **الباوند** (lb) ، حيث .

$$1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N} \quad \text{بالضبط}$$

و :

$$1 \text{ pound (lb)} = 4.4482 \text{ N}$$

من الممكن تحليل التجهات فى المعادلة (3-1 أ) إلى مركباتها المتعامدة لنحصل على معادلة لكل من محاور الإحداثيات الثلاثة :

---

* هذه هى المرة الأولى التى نقابل فيها وحدة مشتقة أعطى لها اسمًا خاصًا . ومن المهم تذكر الوحدات (الأبعاد) الأساسية التى تعرف الوحدة المشتقة لأن هذه هى الطريقة الوحيدة لمعرفة أى الوحدات تختصر مع بعضها عندما تستخدم هذه الوحدة المشتقة فى عملية حسابية معينة .

$$(\mathbf{F}_{net})_x = \Sigma \mathbf{F}_x = m\mathbf{a}_x$$
$$(\mathbf{F}_{net})_y = \Sigma \mathbf{F}_y = m\mathbf{a}_y \qquad \text{(3-1 ب)}$$
$$(\mathbf{F}_{net})_z = \Sigma \mathbf{F}_z = m\mathbf{a}_z$$

الرمز Σ هو علامة الجمع ، وهو يعنى فى المعادلة الأولى جمع المركبات x لكل من القوى المؤثرة ، وبالمثل بالنسبة للمركبات y و z فى المعادلتين الأخيرتين . ومن الضرورى أثناء إجراء عملية الجمع أن تؤخذ إشارات مركبات كل قوة فى الاعتبار بالطبع .

مثال 3-1 :

يراد لسيارة كتلتها 900 kg أن تتسارع من السكون إلى 12.0 m/s خلال 8.00 s فى طريق مستقيم . ما قيمة القوة اللازمة لذلك ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الواجب تطبيقه لتعيين القوة المطلوبة ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى : $\mathbf{F}_{net} = m\mathbf{a}$.

سؤال : الكتلة معطاة . كيف يمكن إيجاد العجلة ؟

الإجابة : نفرض أن العجلة ثابتة ، وعندئذ يمكننا استخدام معادلة الحركة المستنتجة فى الفصل الثانى . ونحن نعلم أن $\mathbf{v}_f = 12.0$ m/s ، $\mathbf{v}_0 = 0$ وأن الزمن لحدوث هذا التغير هو $t = 8.00$ s . إذن يمكننا استخدام المعادلة (2-11) فى العلاقة $\mathbf{a} = (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0)/t$.

الحل والمناقشة :

1 ـ العجلة هى :

$$\mathbf{a} = \frac{12.0\text{ m/s} - 0}{8.00\text{ s}} = +\ 15.0\text{ m/s}^2$$

2 ـ القوة هى :

$$\mathbf{F} = (900\text{ kg})\ (1.50\text{ m/s}^2) = +1350\text{ N}$$

لاحظ إن الإشارتين موجبتان . أى أن السيارة « تتسارع » ، بمعنى أن $\mathbf{a}$ فى اتجاه $\mathbf{v}$ ، ولذلك يجب أن تكون $\mathbf{F}$ فى اتجاه $\mathbf{a}$.

تأكد من فهمك أن kg . m/s^2 هى النيوتن .

تمرين : ما المسافة التى تقطعها السيارة خلال الزمن 8.00 s ؟ **الإجابة :** 48 m .

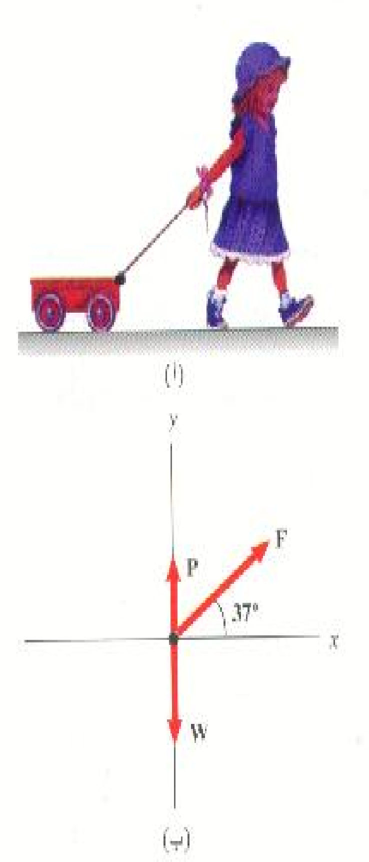
المخططات البيانية للأجسام الحرة

عند تطبيق قانون نيوتن فى مواقف محددة قد تكون القوى المؤثرة فى نفس الوقت

كثيرة : بعض هذه القوى قد يؤثر على الجسم المطلوب إيجاد عجلته ، بينما يؤثر البعض الآخر على الأجسام المحيطة بالجسم . فالشكل 7-3 أ مثلاً يمثل طفلة تجر عربة ، هناك قوى كثيرة مؤثرة على العربة : الحبل ، الجاذبية ، قوة ضغط من أسفل إلى أعلى التى تؤثر بها الأرض الصلبة على عجلات العربة . كذلك توجد قوة مؤثرة على الأرض وعلى الطفلة . ولكن إذا كان اهتمامنا موجهًا إلى حركة العربة فقط فإن هذه القوة لا علاقة لها بالموضوع . **وعمومًا فإن جميع القوة المؤثرة على الأجسام المحيطة بالجسم لا تحدد ما يحدث للجسم ؛ إنها تساعد فقط فى تعيين القوة التى تؤثر عليه مباشرة .**

ولتوضيح هذا الموقف من المفيد أن ترسم صورة تعزل وتحدد فقط تلك القوى المؤثرة على الجسم المعنى . مثل هذه الصورة تسمى **المخطط البيانى للجسم الحر** . وحتى إذا كان بعض القوى المؤثرة على الجسم مجهولاً يمكننا توضيحها فى المخطط البيانى للجسم الحر بالرموز مع تحديد اتجاهاتها . ويمثل الشكل 7-3 ب المخطط البيانى للجسم الحر فى حالة العربة . مثل هذه المخططات البيانية تسهل كتابة كل مجموع فى المعادلات (1-3 ب) ينطبق على العربة .

يعتبر عدم تحديد الاتجاه تحديدًا صحيحًا واحدًا من أشهر مصادر الخطأ فى حسابات المتجهات . ذلك أن اتجاهات القوة المجهولة يمكن عادة معرفتها من المخطط البيانى للجسم الحر ، ومن ثم يمكن استخدام الإشارات الصحيحة فى معادلات المركبات . ويعنى استخدام هذه الإشارات فى المعادلات أننا قد أخذنا الاتجاه فى الاعتبار ؛ وبحل هذه المعادلات سوف نحصل على قيم موجبة تمثل مقادير المتجهات .



شكل 7-3:

القوة المؤثرة على العربة فى (أ) موضحة فى المخطط البيانى للجسم الحر للعربة (ب) .

مثال 2-3 :

لنفرض أن الفتاة تجر العربة كما هو مبين بالشكل 7-3 أ بقوة قدرها 25.0 N ، ونتيجة لذلك تتسارع العربة أفقيًا . ولنعتبر أن كتلة العربة 10.4 kg وأن قوة الجاذبية المؤثرة عل العربة رأسية إلى أسفل ، أى وزنها 102 N . بفرض عدم وجود أى احتكاك يعوق حركة العربة ، أوجد عجلة العربة وقوة الضغط **P** التى تؤثر بها الأرض رأسيًا إلى أعلى على العربة تحت هذه الشروط .

استدلال منطقى :

1

سؤال : القوى المؤثرة على العربة مبينة فى المخطط البيانى للجسم الحر ؛ شكل 7-3 ب . كيف نعلم ما إذا كانت قوة الضغط **P** موجودة بالفعل ؟

الإجابة : تفحص المركبة الرأسية فى قانون نيوتن الثانى (المعادلة 1-3 ب) . إذا كانت حركة العربة أفقية كلية فإن a_y يجب أن تكون صفرًا وبالتالى يكون مجموع القوة الرأسية صفرًا . ومن الممكن أن نرى بسهولة أن مركبة قوة الفتاة إلى أعلى ليست كافية

للتعادل مع وزن العربة وقدره 102 N . لذلك يجب أن تعوض الأرض القوة الإضافية اللازمة وإلا تسارعت العربة فى الاتجاه الرأسى .

سؤال : ما هى المعادلة التى تربط بين مركبات القوة الرأسية ؟

الإجابة : $P + (25.0\ N)(\sin 37.0°) - 102\ N = 0$

سؤال : ما الذى تتعين به العجلة الأفقية ؟

الإجابة : صافى القوة وهو : $(25.0\ N)(\cos 367.0°) = 20.0\ N$

الحل والمناقشة : العجلة هى :

$$a_x = \frac{(F_{net})_x}{m} = \frac{20.0\ N}{10.4\ kg} = 1.92\ m/s^2$$

وقوة الضغط الرأسية إلى أعلى هى :

$$P = 102\ N - (25.0\ N)(\sin 37.0°) = 87.0\ N$$

وقبل التطرق إلى المزيد من تطبيقات قانون نيوتن الثانى سنناقش القانون الثالث ونتفحص الوزن والاحتكاك بشىء من التوسع .

3-5 الفعل ورد الفعل : القانون الثالث



يؤثر كل من المصارعين على الآخر بقوة مساوية ومضادة .

لعلنا نعلم أن الأرض تدور حول الشمس بسبب قوة الجاذبية التى تؤثر بها الشمس على الأرض . وقد تمكن نيوتن من معالجة هذا النوع من الحركة بنجاح بعد اكتشافه لقانون الجاذبية ، وهو الموضوع الذى سنناقشه فى الفصل السابع . ولكن هل تساءلت يومًا ما عن قوة الجاذبية التى تؤثر بها الأرض على الشمس ؟ الواقع أنه لقياس هذه القوة مباشرة يجب أن تجرى القياسات على سطح الشمس نفسها ، وهذا مستحيل طبعًا ولكن لحسن الحظ يمكن تقدير قيمة مثل هذه القوة بعيدة المنال باستخدام قانون آخر لنيوتن هو قانون الفعل ورد الفعل .

ادفع الحائط بإصبعك وستجد أن الحائط يدفع إصبعك إلى الخلف . وكمثال آخر ، لندرس ما يحدث عندما تركل كرة القدم . فى هذه الحالة يؤثر قدمك بقوة معينة على الكرة ، ولكنك تشعر أيضًا بأن الكرة تؤثر على قدمك بقوة فى الاتجاه المضاد . كذلك فإن جسمًا موضوعًا على منضدة يدفعها إلى أسفل بينما المنضدة تدفعه إلى أعلى .

وقد قام نيوتن بدارسة العديد من مثل هذه المواقف وتوصل بعدها إلى استنتاج كمى هو قانون نيوتن الثالث :

إذا أثر جسم A بقوة قدرها $\mathbf{F}$ على جسم آخر B فإن B يؤثر بقوة $-\mathbf{F}$ على الجسم A ، وهذه القوى تساوى $\mathbf{F}$ فى المقدار وتضادها فى الاتجاه .

وتسمى إحدى هاتين القوتين (أى واحدة منهما) **بقوة الفعل** وتسمى الأخرى قوة رد

الفعل ، وينص القانون الثالث على أن قوة رد الفعل مساوية تمامًا لقوة الفعل في المقدار ومضادة لها في الاتجاه . بل إن هذا القانون يعنى أكثر من ذلك إذ أنه يفيدنا أن هاتين القوتين تؤثران على جسمين مختلفين ، فقوة الفعل يؤثر بها جسم على آخر ، بينما الجسم الثانى يؤثر على الأول بقوة رد الفعل المعاكسة .

بناء على القانون الثالث يمكننا القول أن قوة الفعل وقوة رد الفعل متساويتان فى القدار ومتضادتان فى الاتجاه فى كل من الأمثلة المذكورة بالجدول 2-3 . تذكر أن **قوى الفعل ورد الفعل تؤثر على أجسام مختلفة** . هذا وسوف نستخدم هذا القانون من آن إلى آخر لاستنتاج القوة المؤثرة على جسم ما عندما تكون القوة المؤثرة على جسم آخر معلومة .

لإيضاح القانون الثالث افترض أن سيارة ركوب قد اصطدمت بشاحنة نصف مقطورة ، على أى السيارتين تكون الصدمة « أشد » ، أى ذات قوة أكبر ؟ عندما يشاهد غالبية الناس نتائج هذا التصادم فإنهم يستنتجون أن صدمة سيارة الركوب أشد بالتأكيد . لكن قانون نيوتن الثالث يقرر أن القوة التى أثرت بها سيارة الركوب على الشاحنة مساوية فى المقدار (ومضادة فى الاتجاه) للقوة التى أثرت بها الشاحنة على السيارة . كيف يمكننا إزالة التضارب بين هذين الاستنتاجين ؟

أولاً ، إن لغتنا اليومية كثيرًا ما تقصر عن التعبير عن المعانى بالضبط . فبالرغم من أننا نظن أننا نفهم عبارة « تصطدم بقوة أشد » بالضبط ، إلا أنها تخلط بين قوة الصدمة ونتيجتها ، بمعنى أننا نفترض أن الضرر الأشد تسببه قوة أكبر . ولكى نفهم ما الذى يحدد الضرر حقيقة لننظر إلى قانون نيوتن فى صورة أخرى : فالعلاقة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ يمكن كتابتها على الصورة :

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$$

إن من مميزات هذه الصورة أنها تبين كيف تتعين **النتيجة** (العجلة) **بالسبب** (القوة) **فعند تطبيق قوتين متساويتين على جسمين تتعين النتيجة بكتلتى الجسمين** . هذا يعنى أن عجلة الجسم الأكبر كتلة تكون أقل من عجلة الجسم الأصغر كتلة . وعليه فإن سرعة الشاحنة تعانى تغيرًا صغيرًا نسبيًا أثناء التصادم حيث تقل هذه السرعة قليلاً ولكن السيارة تستمر فى الحركة فى نفس الاتجاه . أما سيارة الركوب الخفيفة ، بالرغم من أنها قد صدمت بنفس القوة ، فسوف تتغير سرعتها تغيرًا كبيرًا ، حيث لن تسبب الصدمة توقف السيارة فقط ، بل إنها ستدفعها بشدة فى عكس اتجاه الحركة . هذه العجلة الهائلة تسبب إجهادًا عاليًا جدًا على هيكل السيارة وتؤدى بالتالى إلى أضرار أشد كثيرًا للسيارة مقارنة بالشاحنة ، ولذلك يبدو أنها قد عانت صدمة أشد من الشاحنة .

جدول 2-3 : مواقف مرتبطة بقانون نيوتن الثالث .

الفعل	رد الفعل	تعليقات
وزنك ضاغطا على كرسى إلى أسفل .	الكرسى الصلب دافعًا لك إلى أعلى وبذلك يحمل جسمك .	إذا تفسخ الكرسى أو انكسر فإنك تهوى إلى أسفل .
قوة احتكاك إطارات السيارة المؤثرة على الطريق إلى الخلف عند تسارع السيارة .	قوة احتكاك الطريق المؤثرة على إطارات السيارة (وبالتالى على السيارة) إلى الأمام ، وهو ما يسبب تسارع السيارة .	إذا كان الطريق مغطى بالجليد (أى لم يكن الاحتكاك موجودًا) تدور العجلات ولكن لن يحدث تسارع للسيارة .
القوة التى يؤثر بها مقعد السيارة عليك إلى الأمام وهو ما يسبب تسارعك مع السيارة .	القوة التى تؤثر بها أنت على مقعد السيارة ، وهو ما يجعلك « تغوص » فى المقعد .	إذا كان المقعد من النوع المنحنى إلى الوراء وكان غير مثبت فإنك ستنتهى إلى وضع أفقى عندما تتسارع السيارة .
القوة التى يؤثر بها مضرب البيسبول على الكرة فيجعلها تطير عابرة سور المنزل .	القوة التى تؤثر بها الكرة على المضرب وهى مساوية فى المقدار .	أحيانا تكون قوة رد الفعل من الشدة بحيث تكسر المضرب .
القوة المؤثرة إلى الخلف على هلب تقذفه أفقيا فوق مؤخرة قارب .	القوة التى يؤثر بها الهلب عليك إلى الأمام (وعلى القارب بالتالى) ، وهو ما يسبب اندفاعك واندفاع القارب بشدة إلى الأمام .	هذا هو مبدأ عمل المحركات النفاثة والصواريخ وهى تسمى « محركات رد الفعل » .

3-6 الكتلة وعلاقتها بالوزن

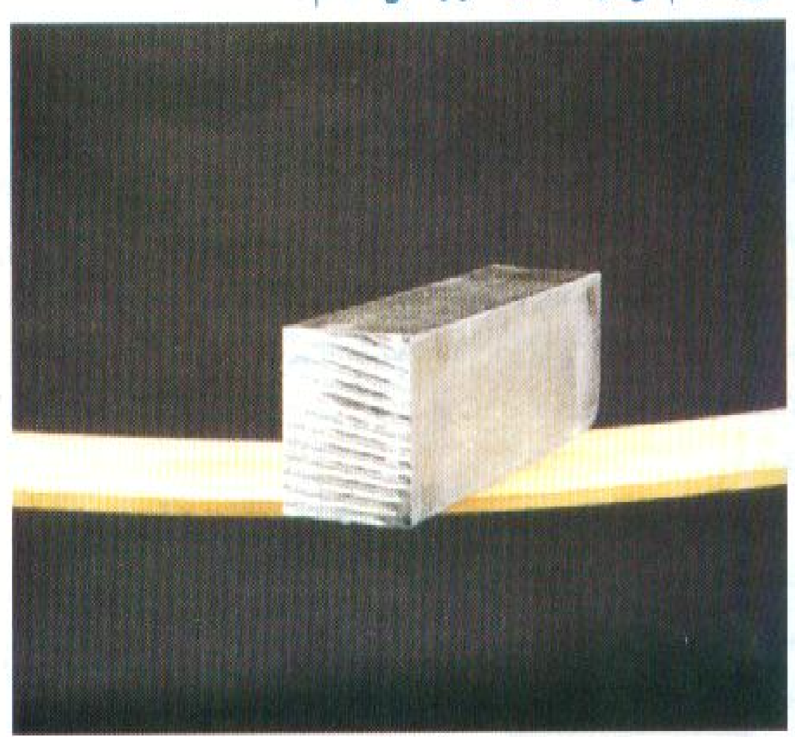
سبق أن عرفنا الكتلة بدلالة الكيلو جرام المعيارى ، ولكن الكتل الأخرى تعرف بمقارنتها بهذا المقياس المعيارى . لنفرض أن قوة معينة قد سلطت أولاً على جسم كتلته كيلو جرامًا معيارًا واحدًا (1 kg) ثم على جسم مجهول الكتلة . فإذا أعطت هذه القوة نفس العجلة للجسمين ، وبفرض عدم وجود أى قوى أخرى غير متزنة على الجسمين ، كان الجسمان متساويين فى الكتلة . هذا ينتج مباشرة من قانون نيوتن الثانى $\mathbf{F}_{net} = m\mathbf{a}$ وذلك لأنه إذا تساوت القوتان وتساوت العجلتان لابد أن تكون الكتلتان متساويتين . وبالمثل ، عندما تكون كتلة الجسم n كيلو جرامًا تكون

عجلته 1/n فقد قدر عجلة تساوى كيلو جرامًا معياريًا واحدًا تحت تأثير نفس القوة . من هذا يتضح أنه يمكن تعيين الكتلة المجهولة لأى جسم بمقارنة عجلته بعجلة جسم كتلته تساوى كيلو جرامًا معياريًا واحدًا عندما يقع كلاهما تحت تأثير نفس القوة .

ولكننا مع ذلك نقوم بتعيين كتل الأجسام « بوزنها » باستخدام النوع المناسب من الموازيين . فعندما نستخدم الميزان القبانى مثلاً فإننا نقوم فى الواقع بمقارنة قوة الجاذبية المؤثرة على الكتلة المجهولة على أحد طرفى الميزان بقوة الجاذبية المؤثرة على كتلة معيارية معلومة على الطرف الآخر . وعند استخدام الميزان الزنبركى فإننا نقيس مقدار الاستطالة اللازمة للزنبرك حتى يؤثر على الكتلة بقوة رأسية إلى أعلى تساوى قوة الجاذبية المؤثرة عليها إلى أسفل .

وهكذا يمكن تعريف الوزن كالتالى :

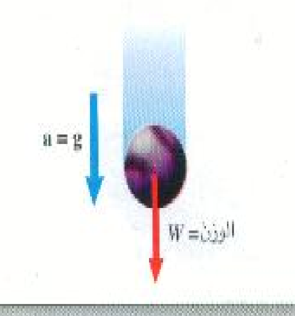
وزن الجسم هى قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم .



ينحنى اللوح الخشبى الذى يحمل جسمًا ثقيلاً تحت تأثير وزن الجسم .

من الضرورى جدًا أن نعى أن كتلة الجسم ووزنه ، بالرغم من ارتباطهما أحدهما بالآخر ، هما خاصيتان فيزيائيتان مختلفتان تمامًا . فالوزن **قوة** بينما الكتلة أحد الأبعاد الأساسية .

هناك تجربة بسيطة للتعرف على العلاقة بين الكتلة والوزن . عندما تكون القوة الوحيدة المؤثرة على جسم ما هى وزنه (أى قوة الجاذبية المؤثرة عليه) يتحرك الجسم بعجلة السقوط الحر g (شكل 8-3) . فإذا رمزنا للوزن بالرمز W يمكن كتابة قانون نيوتن الثانى فى حالة السقوط الحر لجسم على الصورة :



شكل 8-3:
القوة غير المتزنة المؤثرة على الجسم وهى W تعطيه عجلة تساوى عجلة السقوط الحر g .

$$F_{net} = W = mg \qquad (3-2)$$

وحتى إذا كان الجسم مستقرًا على منضدة أو على الأرضية لن تتغير قوة الجاذبية . وعليه فإن المعادلة (2-3) تنص على أن الوزن **يتناسب** مع الكتلة .

وهذا وتعتمد قوة الجاذبية المؤثرة على جسم معين على مكانه . ذلك أن عجلة g على سطح الأرض تختلف اختلافًا طفيفًا من خط الاستواء إلى القطبين ومن مستوى سطح البحر إلى قمم الجبال العالية . وسوف نرى فى الفصل السابع أن الجاذبية تختلف كثيرًا من كوكب إلى آخر ، فالجاذبية على سطح القمر مثلًا سدس جاذبية الأرض . وعليه فإن **وزن الجسم قد يتغير ، ويتوقف هذا على شدة قوة الجاذبية عند موقع الجسم** . ولكن كتلة الجسم ، من ناحية أخرى ، واحدة بغض النظر عن ظروف الجاذبية .

مثال توضيحى 3-1

ما وزن جسم كتلته 5.25 kg ؟ وما كتلة جسم يزن 14.6 N . افترض أن قيمة g فى كلتى الحالتين $9.80\ m/s^2$ ؟

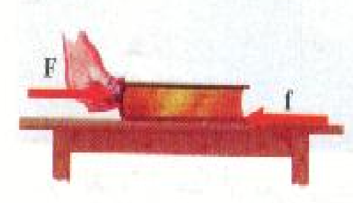
استدلال منطقى : حيث أن $W = mg$ ، فإن وزن جسم كتلته 5.25 kg هو :

$$W = (5.25\ kg)(9.80\ m/s^2) = 51.5\ N$$

وبوضع المعادلة (2-3) على الصورة $m = W/g$ ، نجد أن الكتلة المناظرة لوزن قدره 14.6 N هى :

$$m = \frac{14.6\ N}{9.8\ m/s^2} = 1.49\ kg$$ ■

3-7 قوى الاحتكاك



شكل 3-9:
قوة الاحتكاك f تعاكس انزلاق الكتاب .

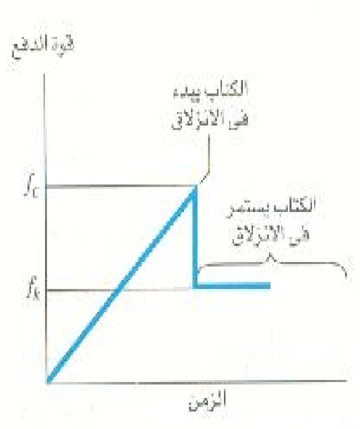
قبل التطرق إلى استخدام قانون نيوتن الثانى سنقوم بمناقشة الاحتكاك لأن قوى الاحتكاك تلعب دورًا هامًا فى كثير من تطبيقات قوانين نيوتن .

حاول إجراء التجربة الموضحة بالشكل 3-9 . ادفع كتابك المدرسى دفعًا خفيفًا بقوة أفقية ، لن يتحرك الكتاب . ونظراً لأن الكتاب يظل ساكنًا نستنتج أن $\mathbf{F}_{net} = 0$. وعليه فلابد أن توجد على الأقل قوة واحدة مؤثرة فى عكس اتجاه القوة التى تؤثر أنت بها على الكتاب . هذه القوة المضادة توفرها المنضدة حيث تتلامس مع الكتاب ، وهى القوة **f** فى الشكل ، وسنسميها قوة الاحتكاك الاستاتيكى . ومن الواضح أن قوة الاحتكاك الاستاتيكى تتميز بالخواص الآتية : **إنها تعاكس محاولة انزلاق الجسم واتجاهها مواز لسطحى التلامس** .



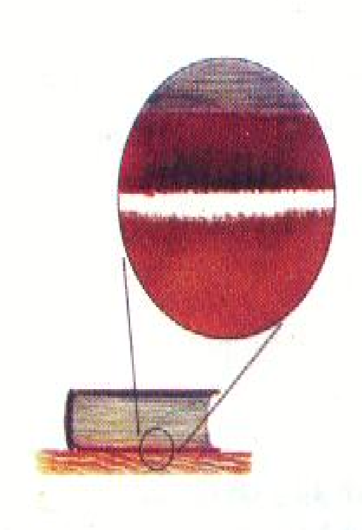
نعلم من خبرتنا اليومية أن قوة الاحتكاك بين سطحين تسبب تسخين هذين السطحين – وهذه الحقيقة تستخدم كثيرًا لبدء النيران .

والآن قم بزيادة قوة دفعك للكتاب تدريجيًا وببطء كما هو مبين بالشكل 10-3 . عندما يصل مقدار الدفع إلى قيمة حرجة معينة f_c سوف يبدأ الكتاب في الحركة فجأة . ولكي تحتفظ بالكتاب متحركًا لن تحتاج إلا إلى قوة أصغر مقدارها f_k . (الدليل السفلي k أول حرف في الكلمة الإنجليزية kinetic بمعنى « متحرك ») . هذه التجربة توضح أن هناك قوتي احتكاك هامتين ، أولاهما هي قوة الاحتكاك العظمى (الحرجة) f_c وهي القوة اللازمة لكي يبدأ الجسم الحركة ، والثانية هي قوة احتكاك أصغر f_k تعاكس حركة الجسم المنزلق . تذكر أن f_c هي القيمة العظمى التي يمكن أن يصل إليها الاحتكاك الاستاتيكي f_s . والاحتكاك الاستاتيكي يمنع بدء الحركة الانزلاقية لأي قيمة للقيمة f_s وحتى القيمة الحرجة .



شكل 10-3:
الكتاب في الشكل 9-3 يبدأ في الانزلاق عندما تتساوى قوة الدفع مع f_c أو تزيد .

يمكن إدراك الأسباب الرئيسية لهذا السلوك من الشكل 11-3 : فالسطحان المتلامسان أبعد من أن يكونا أملسين على الإطلاق ، وحتى الأسطح المصقولة ستبدو بهذا الشكل عند رؤيتها تحت تكبير عال . فإذا تلامس سطحان سوف تدخل النقط البارزة لأحد السطحين في وديان السطح الآخر ، وهذا يسبب مقاومة السطحين للانزلاق . ولكن ما أن يبدأ الانزلاق لن يجد السطحان وقتًا كافيًا لتلاحم أحدهما مع الآخر تلاحمًا كاملًا . ونتيجة لذلك تكون القوة اللازمة لاستمرار الحركة أقل من القوة اللازمة لبدء الحركة .



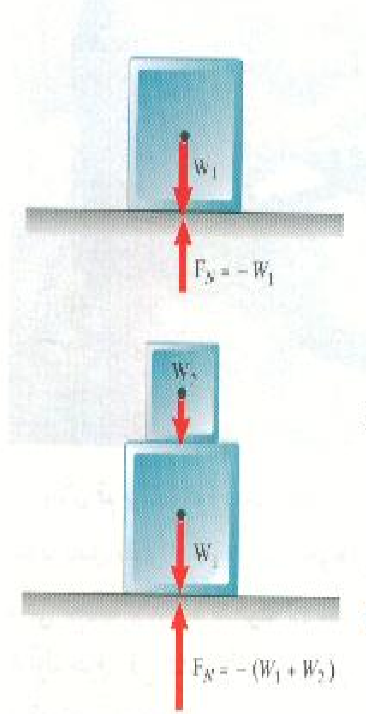
شكل 11-3 :
يظهر السطحان خشنين عند تكبيرهما .

وكما هو متوقع من هذا النموذج فإن قوة الاحتكاك تعتمد على درجة تلاصق السطحين أحدهما مع الآخر ، وتوصف هذه السمة من سمات الموقف بما يسمى القوة العمودية F_N ، ومن أمثلتها القوة العمودية التي يؤثر بها سطح يحمل جسمًا على هذا الجسم . ويمثل الشكل 12-3أ قالبًا يدفع السطح الحامل إلى أسفل بقوة تساوي وزن القالب ، ومن جهة أخرى يدفع السطح الحامل ذلك القالب بقوة مساوية ومضادة ، أي أن $F_N = W_1$ في هذه الحالة . وبالمثل فإن قوة الدفع إلى أسفل

على السطح الحامل تساوى مجموع وزنى القالبين ، أى أن القوة الحاملة هى $F_N = W_1 + W_2$ فى هذه الحالة :

تبين التجارب العملية أن مقدارى f_c و f_k يتناسب عادة مع F_N ، ويمكن وصف ذلك رياضيًا كما يأتى :

$$f_c = \mu_s F_N \qquad f_k = \mu_k F_N \qquad (3\text{-}3)$$

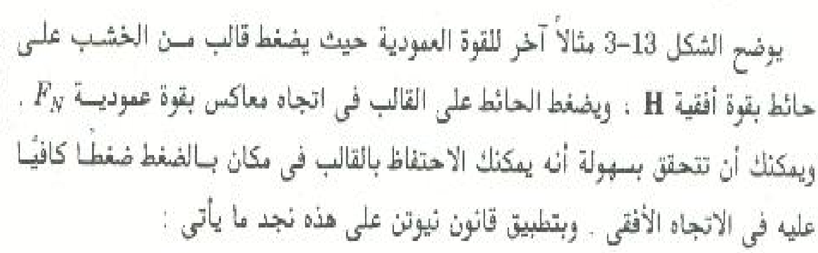


شكل 12-3:
القوة العمودية F_N هى القوة التى يؤثر بها السطح الحامل على الجسم المحمول .

حيث μ هو الحرف اليونانى ميو . ويسمى العاملان f_s و f_k **معاملى الاحتكاك الاستاتيكى والحركى** ، على الترتيب . وتختلف قيمتا هذين العاملين اختلافًا كبيرًا ، ويعتمد ذلك على مادة كل من السطحين ودرجة نظافتهما وجفافهما ، ويمثل الجدول 3-3 بعض القيم النمطية لهذين العاملين .

بالرغم من أن قوى الاحتكاك تعتمد بدرجة كبيرة على نعومة ونظافة السطحين ، يمكن وضع العبارتين التقريبيتين الآتيتين : (1) عند السرعات المنخفضة لا تتغير f_k كثيرًا مع السرعة عند انزلاق سطح على آخر ، (2) عندما تكون F_N ثابتة لا تعتمد قيمة كل من f_c و f_k تقريبًا على مساحة سطح التلامس بين الجسمين .

اتجاه قوة الاحتكاك يوازى السطحين دائمًا ، ولكن مقدار القوة يتناسب مع مقدار قوة الضغط على الجسمين .



يوضح الشكل 13-3 مثالاً آخر للقوة العمودية حيث يضغط قالب من الخشب على حائط بقوة أفقية **H** ، ويضغط الحائط على القالب فى اتجاه معاكس بقوة عمودية F_N . ويمكنك أن تتحقق بسهولة أنه يمكنك الاحتفاظ بالقالب فى مكان بالضغط ضغطًا كافيًا عليه فى الاتجاه الأفقى . وبتطبيق قانون نيوتن على هذه نجد ما يأتى :

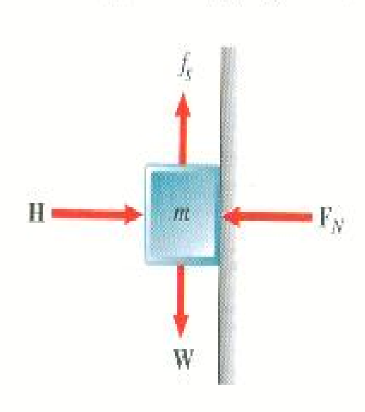
1 ـ بما أنه لا وجود لأى عجلة أفقية ، إذن $F_N = H$.

2 ـ لكى يظل القالب ساكنًا يجب أن يوجد احتكاك استاتيكى كاف إلى أعلى بحيث يتزن مع الجاذبية إلى أسفل . إذن $f_s = mg$.

إذن $f_c = \mu_s F_N = \mu_s H$ ، فى هذه الحالة . هذا مثال يبين أنه ليس من الضرورى أن تكون القوة العمودية رأسية ، ولكن اتجاهها يعتمد على توجيه السطحين .



مثل لمعامل احتكاك منخفض بين الثلج والبلاستيك .



شكل 13-3:
يمكن لقوة أفقية أن توفر الاحتكاك الكافى لمنع القالب من السقوط .

جدول 3-3 : بعض قيم معاملي الاحتكاك

المواد المتلامسة	μ_s	μ_k
مطاط على خرسانة جافة	~ 0.9	~ 0.7
مطاط على خرسانة مبتلة	0.7	0.5
خشب على جليد	0.08	0.06
حديد صلب على تفلون	0.04	0.04
حديد صلب على حديد صلب	0.75	0.57
حديد صلب على ثلج	0.02	0.01
خشب على خشب	0.7	0.4
معدن على معدن (مشحم)	0.10	0.07
زجاج على زجاج	0.9	0.4

مثال توضيحى 3-2

ارجع إلى الشكل 13-3 ، ما أقل قيمة للقوة H يجب أن تؤثر بها على القالب ليظل فى مكانه ؟ كتلة القالب 2.2 kg ومعامل الاحتكاك الاستاتيكى بين الحائط والقالب 0.65 .

استدلال منطقى : وزن القالب هو $W = mg = (2.2\text{kg})(9.8\ \text{ms}^2) = 22\ \text{N}$ ، وقوة الاحتكاك الاستاتيكى إذن يجب أن تساوى هذه القوة فى المقدار : $f_s = 22\ \text{N}$ ، حيث f_s يمكن أن تأخذ أى قيمة إلى :

$$f_s \leqslant f_c = \mu_s F_N = \mu_s H$$

وعليه فإن القوة المسلطة **H** يجب أن تكون :

$$H \geqslant \frac{f_s}{\mu_s} = \frac{22\ \text{N}}{0.65} = 34\ \text{N}$$

أى أن أقل قوة تخلق الاحتكاك الكافى لحفظ القالب فى مكانه 34 N .

3-8 تطبيقات قانون نيوتن الثانى

أصبح لدينا الآن الخلفية الضرورية لتطبيق قانون نيوتن الثانى على مجموعة من المواقف المختلفة . وقبل أن نعرض للأمثلة سنوضح الطريقة العامة الواجب اتباعها فى الحل .

1 ـ ارسم رسمًا تخطيطيًا للمسألة .

2 ـ اعزل الجسم الذى سيطبق على القانون $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

3 ـ ارسم المخطط البيانى للجسم الحر للجسم المعزول موضحًا جميع القوى المؤثرة عليه ، ولا توضح القوى التى لا تؤثر على الجسم مباشرة .

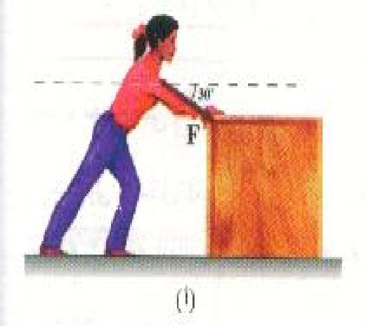
4 ـ اختر نظام إحداثيات مناسب للمخطط البياني للجسم الحر وأوجد مركبات القوى .

5 ـ اكتب القانون $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ في صورة معادلات للقوى المبينة في المخطط البياني للجسم الحر . وعند التعويض في هذه المعادلات بالقيم العددية يجب أن تكون القوة $\mathbf{F}$ بالنيوتن والكتلة m بالكيلو جرام والعجلة $\mathbf{a}$ بالوحدات m/s^2 ؛ ولا تنس أن $m = W/g$.

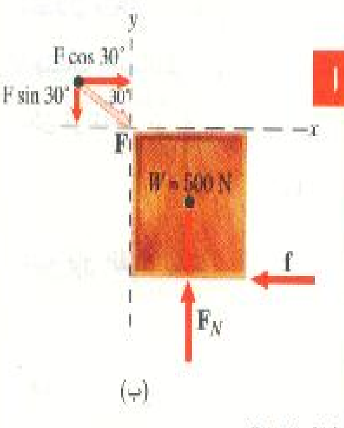
6 ـ حل معادلات المركبات بالنسبة إلى المجاهيل .

7 ـ تحقق من معقولية النتائج .

قد تضطر أحيانًا ، عندما يكون أكثر من جسم واحد متحركًا ، إلى تكرار الخطوات 2 إلى 5 لأجسام أخرى خلاف الجسم المعزول . ومع أننا لا نبين كل خطوة في الأمثلة الآتية للاختصار فإن حذفها لا يقلل من أهميتها .



(أ)



(ب)

شكل 14-3:
لاحظ أن القوة العمودية المؤثرة على الصندوق تساوي: $500\ N + F \sin 30°$.

مثال 3-3 :

تدفع إمرأة صندوقًا يزن 500 N بقوة متجهة بزاوية قدرها °30 تحت الأفقي كما هو مبين بالشكل 14-3أ . (أ) ما قيمة $\mathbf{F}$ اللازمة لبدء انزلاق الصندوق ؟ (ب) إذا استمرت المرأة في دفع الصندوق بنفس هذه القوة بعد بداية انزلاقه ، فماذا ستكون قيمة العجلة ؟ افترض أن الصندوق والأرضية مصنوعان من الخشب واستخدم قيم معاملات الاحتكاك المعطاة في الجدول 3-3 .

استدلال منطقي : الجزء (أ)

سؤال : تحت أي شرط سوف يبدأ الصندوق في الانزلاق ؟

الإجابة : عندما تكون القوة الأفقية المسلطة مساوية للقوة الحرجة للاحتكاك الاستاتيكي f .

سؤال : ما الكميات الضروري معرفتها ليمكن إيجاد f_c ؟

الإجابة : $\mu_s = 0.7$ ، $f_c = \mu_s F_N$ ، كما هو واضح من الجدول 3-3 .

السؤال : ما المبدأ الممكن استخدامه لتعيين F_N ؟

الإجابة : المركبة الرأسية للعجلة تساوي صفرًا ؛ إذن $\Sigma F_y = 0$ طبقًا لقانون نيوتن الثاني . لاحظ وجود قوتين رأسيتين إلى أسفل وأن اتجاه F_N إلى أعلى .

سؤال : ما شكل المخطط البياني للجسم الحر في حالة الصندوق ؟

الإجابة : كما هو مبين بالشكل 14-3ب . عندما يبدأ الصندوق في الانزلاق تكون $f = f_c$.

سؤال : ما الشرط اللازم تحققه حتى يبدأ الصندوق في الانزلاق ؟

الإجابة : $F \cos 30° \geqslant f_c = (0.7) F_N$

الحل والمناقشة : لدينا معادلتان آنيتان في مجهولين هما F و F_N ، ويجب أولاً إيجاد F_N بدلالة F :

$$F_N = W + F \sin 30°$$

لاحظ أن الأرضية يجب أن تحمل **أكثر** من مجرد الوزن . وطبقا لقانون نيوتن الثالث فإن القوة المؤثرة على الأرضية تساوى فى المقدار نفس هذا القدر من القوة .

بالتعويض عن F_N فى معادلة القوة الأفقية نحصل على :

$$F \cos 30° = (0.7)(F \sin 30° + 500\ \text{N})$$

وبتجميع الحدود :

$$F[\cos 30° - 0.7(\sin 30°)] = 0.7\ (500\ \text{N})$$

$$F(0.866 - 0.35) = 530\ \text{N}$$

$$F = \frac{350\ \text{N}}{0.516} = 678\ \text{N}$$

الآن يمكننا إيجاد F_N إن شئنا :

$$F_N = F \sin 30° + W = (678\ \text{N})(0.500) + 500\ \text{N} = 839\ \text{N}$$

تحقق من تساوى القوتين الأفقيتين :

$$F \cos 30° = (678\ \text{N})(0.866) = 587\ \text{N}$$

$$f_s = \mu_s F_N = 0.7(839\ \text{N}) = 587\ \text{N}$$

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : لماذا سيتسارع الصندوق ؟

الإجابة : لأن الاحتكاك يقل إلى $f_k = \mu_k F_N$ بمجرد أن يبدأ الصندوق فى الحركة . إذا استمرت المرأة فى دفع الصندوق بالقوة السابق إيجادها فسوف يوجد صافى قوة فى الاتجاه الأفقى .

سؤال : هل ستتغير F_N ؟

الإجابة : $F_N = F \sin 30° + W$. لن يتغير شىء فى هذه العلاقة .

سؤال : ما قيمة صافى القوة الأفقية ؟

الإجابة : $587\ \text{N} - (0.4)(839\ \text{N}) = 587\ \text{N} - 336\ \text{N} = 251\ \text{N}$

سؤال : أى مبدأ يستخدم لتعيين العجلة ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى $a = F_{net}/m$ ، حيث m كتلة الصندوق .

سؤال : ما قيمة m ؟

الإجابة : ترتبط الكتلة بالوزن بالعلاقة $W = mg$ أو $m = W/g$.

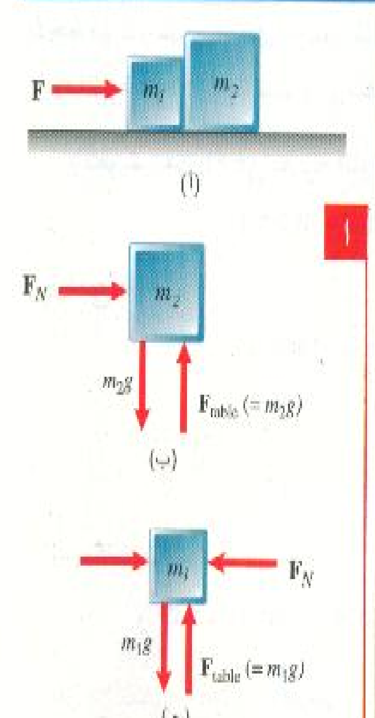
وهنا $m = (500\ \text{N})/(9.8\ \text{m/s}^2) = 51\ \text{kg}$.

الحل والمناقشة : بالتعويض بالقيم العددية نجد أن $a = (251\ \text{N})/(51\ \text{kg}) = 4.92\ \text{m/s}^2$.

مثال 3-4 :

قالبان كتلة الأول $m_1 = 1.0\ \text{kg}$ والثانى $m_2 = 2.0\ \text{kg}$ متلامسان أحدهما بالآخر على

منضدة أفقية كما هو مبين بالشكل 15-3أ ، وكان الاحتكاك بين كل من القالبين والمنضدة مهملاً . سلطت قوة **F** على m_1 فسببت تسارع القالبين إلى اليمين بعجلة $a = 3.0\ m/s^2$. (أ) ما مقدار القوة F ؟ (ب) ما قيمة قوتى التضاغط بين القالبين ؟



شكل 15-3: المخطط البيانى للجسم الحر لكل من القالبين يبين قوتى التضاغط العموديتين بين القالبين .

استدلال منطقى :

سؤال : القالبان يتحركان معًا ، هل يمكن معاملتهما كجسم واحد كتلته $M = 3.0\ kg$ ؟

الإجابة : نعم ، فى الجزء (أ) .

سؤال : ما مبدأ تعيين F ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى : $F = ma = (3.0\ kg)(3.0\ m/s^2) = 9.0\ N$.

سؤال : القوة التضاغطية غير مبينة فى الشكل 15-3أ . كيف يمكن تعيينها ؟

الإجابة : سوف تظهر القوى التضاغطية عند عزل كل قالب فى المخطط البيانى للجسم الحر الخاص به . لابد أن تتواجد قوة عمودية أفقية من نوع ما بين القالبين لأنهما يدفعان معا .

سؤال : ما شكل المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالقالب m_2 ؟

الإجابة : هذا مبين بالشكل 15-3ب . القوة **F** تؤثر على m_1 فقط ، ولذلك لا تظهر فى مخطط الجسم الحر الخاص بالقالب m_2 .

سؤال : ما المبدأ المستخدم لتعيين F_N ؟

الإجابة : F_N هى قوة التضاغط بين القالبين الأصليين ، وهى القوة الأفقية الوحيدة المؤثرة على m_2 ومن ثم فهى المسئولة عن عجلة m_2 طبقًا لقانون نيوتن الثانى .

سؤال : ما المعادلة التى تعطى F_N ؟

الإجابة : F_N $F_N = m_2a = (2.0\ kg)(3.0\ m/s^2) = 6.0\ N$.

سؤال : بماذا تتعين قوة التضاغط المؤثرة على m_1 ؟

الإجابة : ينص قانون نيوتن الثالث على أن هذه القوة مساوية ومضادة للقوة المؤثرة على m_2 .

سؤال : ما شكل المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالكتلة m_1 ؟

الإجابة : هذا مبين بالشكل 15-3جـ .

الحل والمناقشة : لاحظ أن صافى القوة المؤثرة على m_1 وحدها هو $F - F_N$. (ما معنى الإشارة السالبة) . إذن ، بالنسبة للكتلة m_1 :

$$F - F_N = m_1a = (1.0\ kg)(3.0\ m/s^2) = 3.0\ N$$

وهذا يعطى $F_N = F - 3.0\ N = 6.0\ N$ ، وهو ما يتفق مع النتيجة الخاصة بالكتلة m_2 .

مثال 5-3 :

سيارة وزنها 3300 lb تتحرك بسرعة قدرها 38 mi/h . فى لحظة معينة ضغط السائق على الفرامل بشدة فتزحلقت السيارة حتى سكنت تمامًا . وأثناء التزحلق تعرضت

إطارات السيارة لقوة احتكاك قدرها حوالى 0.70 مرة قدر وزن السيارة . ما المسافة التى تقطعها السيارة قبل توقفها تمامًا ؟ اعتبر أن الحركة فى اتجاه المحور x .

1

استدلال منطقى :

سؤال : ما الكمية المطلوب تعيينها ؟

الإجابة : x المسافة التى قطعتها السيارة أثناء تباطؤها من سرعة قدرها 38 mi/h+ إلى الصفر .

سؤال : ما الذى يسبب توقف السيارة ؟

الإجابة : قوة احتكاك ثابتة قدرها 0.70 مرة قدر وزن السيارة .

سؤال : ما المبدأ الذى يربط هذه القوة بالتغير فى السرعة ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى . $a = \frac{F_{net}}{m}$. وحيث أن الاحتكاك هو القوة الأفقية الوحيدة ، إذن $F_{net} = 0.70\, W_{car}$.

سؤال : لاستخدام قانون نيوتن الثانى يلزم معرفة كتلة السيارة . كيف نحصل عليها ؟

الإجابة : من العلاقة $m = W / g$.

سؤال : الآن أصبح كل ما نحتاجه لتعيين a باستخدام القانون الثانى معلومًا ، ولكن الزمن الذى تستغرقه السيارة لكى تتوقف تمامًا ما زال مجهولاً . هل هناك مبدأ يربط التغير فى مقدار السرعة مباشرة بالمسافة المطلوب إيجادها .

الإجابة : معادلة الحركة ذات العجلة المنتظمة التى تربط x مباشرة بالتغير فى مقدار السرعة هى :

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$

وبإيجاد a من القانون الثانى يمكن حل هذه المعادلة بالنسبة إلى x .

سؤال : من الواضح أن بعض الوحدات غير متجانسة . هل يجب تحويلها ؟

الإجابة : نعم ، لأننا نستخدم نظام الوحدات SI فى هذا الكتاب . يجب تحويل الوزن بالباوند إلى النيوتن ، وعندئذ نحصل على الكتلة ، بالكيلو جرامات . يجب أيضًا تحويل الوحدة mi/h إلى m/s .

الحل والمناقشة :

1 ـ تحويل الوحدات يعطى :

$$W_{car} = (3300\,\not{lb})(4.45\text{N}/1\,\not{lb}) = 1.5 \times 10^4\ \text{N}$$

$$v_0 = (38\,\not{mi}/\not{h})(1.61\ \text{km}/\not{mi})(1.00\,\not{h}/3600\ \text{s}) = 1.7 \times 10^{-2}\ \text{km/s} = 17\ \text{m/s}$$

2 ـ كتلة السيارة هى :

$$M_{car} = \frac{W_{car}}{g} = \frac{1.5\times10^4\ \text{N}}{9.8\ \text{m/s}^2} = 1.5 \times 10^3\ \text{kg}$$

3 ـ قوة الاحتكاك تكون :

$$F_{net} = -0.70(1.5 \times 10^4\ N) = -1.0 \times 10^4\ N$$

الإشارة السالبة متفقة مع اتجاه قوة الاحتكاك وهو الاتجاه السالب للمحور x .

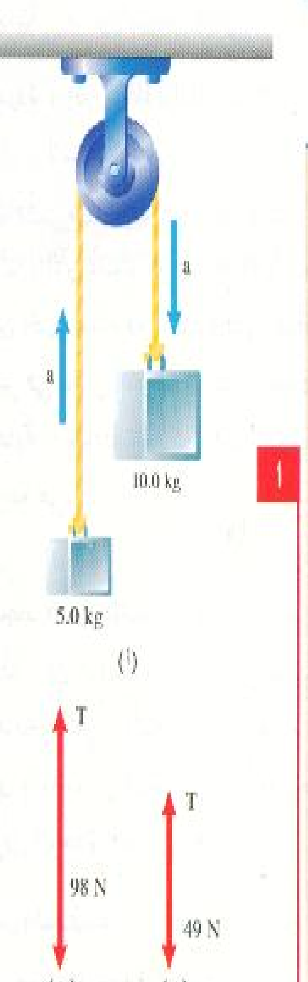
4 ـ العجلة هى :

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{-1.0\times10^4\ N}{1.5\times10^3\ kg} = -6.9\ m/s^2$$

5 ـ إذن ، المسافة التى تقطعها السيارة قبل التوقف :

$$x = \frac{v_f^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0-(17\ m/s^2)}{2(-6.9\ m/s^2)} = 21\ m$$

هذا المثال يوضح كيف يمكن ربط المبدأين معًا ، فلإيجاد الحل اهتم بشكل خاص بكيفية تحويل كلمات المسألة إلى معادلات باستخدام هذين المبدأين .



شكل 16-3:
عجلتا القالبين متساويتان فى المقدار ومتضادتان فى الاتجاه كما هو مبين .

مثال 6-3 :

الكتلتان فى الشكل 16-3 مربوطتان فى طرفى حبل عديم الكتلة ، والحبل معلق على بكرة عديمة الكتلة وعديمة الاحتكاك* . أوجد عجلة الكتلتين . (هذا الجهاز يسمى آلة أتوود)

استدلال منطقى :

سؤال : هل تختلف عجلة إحدى الكتلتين عن الآخرى ؟

الإجابة : لا . فنحن نفترض أن الحبل لا يستطيل ، ولذلك فالكتلتان تتحركان بنفس العجلة .

سؤال : ما المبدأ الذى يعين العجلة ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى مطبقًا على كل كتلة على حدة .

سؤال : ما هى القوى المؤثرة على الكتلتين ؟

الإجابة : وزن كل من الكتلتين mg إلى أسفل ، والشد فى الحبل T ويتجه دائمًا فى اتجاه الحبل مبتعدًا عن الجسم المعلق فيه .

سؤال : ما شكل المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بكل من الكتلتين ؟

الإجابة : كما هو مبين بالشكلين 16-3ب ، جـ . لاحظ عدم وجود البكرة فى الشكلين لأنها تقوم فقط بحمل الحبل .

سؤال : أثناء حركة المجموعة تكون إحدى الكتلتين صاعدة إلى أعلى وتكون الأخرى هابطة إلى أسفل . كيف نختار الاتجاه الموجب للمتجهات ؟

* ذكر فى نص المسألة أن الحبل والبكرة عديمى الكتلة حتى يمكن إهمال عزمى قصورهما الذاتيين . ولأن البكرة عديمة الكتلة وعديمة الاحتكاك فى نفس الوقت يكون الشد فى الحبل متساويًا على جانبى البكرة .

الإجابة : حيث أننا سنطبق قانون نيوتن الثانى علـى كـل مـن الكتلتـين علـى حـدة ، يمكننا اختيار اتجاه حركة كل كتلة باعتباره الاتجاه الموجب لحركتها . ونظـرًا لأن الكتلـة 10 kg أكبر من الأخرى فإنها سوف تتحرك إلى أسفل .

سؤال : ما هما المعادلتان الناتجتان من تطبيق قانون نيوتن الثانى فى هاتين الحالتين ؟

الإجابة : $98\text{ N} - T = (10\text{ kg})a$

$$T - 49\text{ N} = (5\text{ kg})a$$

لاحظ وجود مجهولين هما a و T ، ولذلك يجب حل هاتين المعادلتين آنيا .

الحل والمناقشة : بجمع المعادلتين يمكن حذف T والحصول على معادلة واحـدة يجب حلـها بالنسبة إلى a :

$$98\text{ N} - \cancel{T} + \cancel{T} - 49\text{ N} = (10\text{ kg})a + (5\text{ kg})a = (15\text{ kg})a$$

إذن :

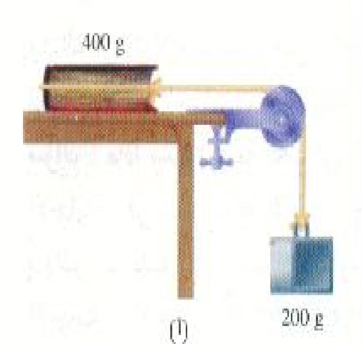
$$T = \frac{49\text{ N}}{16\text{ kg}} = 3.3\text{ m/s}^2$$

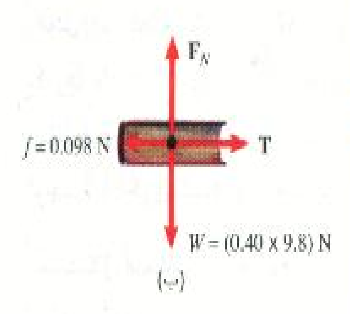
ويمكنك إن شئت التعويض عن a فى إحدى المعادلتين السابقتين لإيجاد الشد فى الحبل :

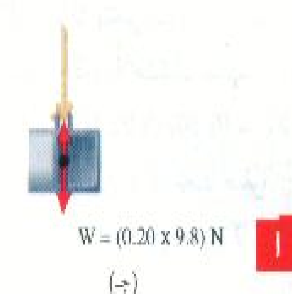
$$T = (5\text{ kg})(3.3\text{ m/s}^2) + 49\text{ N} = 65\text{ N}$$

تمرين : ما هى الصورة العامة لمعادلـة عجلـة هـذا النظام إذا كـانت الكتلـة الأكـبر m_1 والكتلة الأصغر m_2 ؟

الإجابة : $a = \left(\dfrac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}\right)g$







شكل 3-17:
بالرغم من أن قوة الاحتكاك تعوق الحركـة إلا أن وزن الكتلة 200 g كبيرا كبرا كافيا بحيث يسبب حركة الجسمين . أما وزن الكتاب فيتزن مع دفع المنضدة .

مثال 3-7 :

يمثل الشكل 3-17أ كتابًا كتلته 400 g على منضدة مربوطـًا فـى خيـط يمـر علـى بكـرة لا احتكاكية عديمة الكتلة ويتعلق فـى طرفه الآخـر كتلة قدرها 200 g . ويمثل الشكلان 3-17ب ، 3-17جـ الخططين البيانيين للجسم الحر للكتاب والكتلة المعلقة فـى الخيـط . بفرض أن معاملى الاحتكاك هما $\mu_s = 0.4$ ، $\mu_k = 0.2$ ، (أ) هـل تبـدأ المجموعـة فـى الحركة إذا حررت من السكون ؟ (ب) وإذا تحركت المجموعة ، فما قيمة عجلة الكتاب ؟

استدلال منطقى الجزء (أ):

سؤال : ما معنى أن البكرة لا احتكاكية وعديمة الكتلة ؟

الإجابة : معنى ذلك أن دوران البكرة لا يحتاج إلى أى قوة مهما كـانت ، وأن الـهدف الوحيد منها هو تغيير اتجاه الشد فى الخيط .

سؤال : ما الشرط اللازم لبدء حركة الكتاب ؟

الإجابة : أن تكون قوة الشد التى يؤثر بها الخيط على الكتاب مساوية على الأقل للقوة

الحرجة للاحتكاك الاستاتيكى f_c .

سؤال : كيف يمكن تعيين مقدار الشد فى الخيط ؟

الإجابة : بتطبيق قانون نيوتن الثانى على كل من الكتاب والكتلة 200 kg . لاحظ أن الخيط يفيد الجسمين بحيث يتحركان معًا ، ومن ثم يجب أن يكون مقدارا عجلتيهما متساويين عندما يكونا فى حالة حركة .

سؤال : هل يجب أن يتساوى الشد فى الحبل على جانبى البكرة ؟

الإجابة : نعم ، طالما كانت البكرة لا احتكاكية وعديمة الكتلة ، وهذه نتيجة مباشرة طبقًا لقانون نيوتن الثالث . هذا وسوف نتعرض للبكرات « الحقيقية » فى فصول لاحقة .

سؤال : ما المعادلات التى سنحصل عليها من قانون نيوتن الثانى عند تطبيقه على الكتاب ؟

الإجابة : $F_N = W = (0.400\ kg)(9.80\ m/s^2) = 3.92\ N$ للاتجاه الرأسى ،

$T - f = (0.400\ kg)a$ للاتجاه الأفقى .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من قانون نيوتن الثانى بالنسبة للكتلة المعلقة ؟

الإجابة : $(0.200\ kg)(9.80\ m/s^2) - T = (0.200\ kg)a$. لاحظ فى هذه المعادلة وكذلك فى المعادلة المذكورة فى الإجابة السابقة أننا قد افترضنا أن الاتجاه الموجب للمتجهات هو ذلك الاتجاه الذى يمكن أن يتحرك كل جسم فيه .

سؤال : ماذا ستكون قيمة الشد فى الحالة الاستاتيكية ؟

الإجابة : فى تلك الحالة $a = 0$ ، وعليه فمن الإجابة السابقة $T = 1.92\ N$.

سؤال : ما قيمة قوة الاحتكاك الحرجة ؟

الإجابة : $f_c = \mu_s F_N = (0.40)(3.92\ N) = 1.6\ N$.

الحل والمناقشة : لاحظ أن هذه القوة وحدها لا يمكنها الإمساك بالكتاب ضد قوة الشد وقدرها 1.92 N . والسؤال الجوهرى السابق طرحه وهو « ماذا إذا كانت هذه حالة استاتيكية ؟ » إجابته أن هذا مستحيل فيزيائيًا . ذلك أن الكتاب سوف ينزلق ما لم توجد قوة أخرى لمساعدة الاحتكاك .

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ماذا يتغير نتيجة لحركة الكتاب ؟

الإجابة : قوة الاحتكاك ستكون قوة احتكاك استاتيكى :

$f = \mu_k F_N = (0.20)(3.92\ N) = 0.80\ N$ ، وهى أقل من f_c . وأيضًا ، T لن تساوى الوزن المعلق لأن a لم تعد صفرًا . هذا وقد رأينا سابقًا أن قانون نيوتن الثانى يعطى معادلتين تحتويان على a و T .

الحل والمناقشة : المعادلتان اللتان تحتويان على a و T هما :

$$T - 0.80\ N = (0.400\ kg)a \quad \text{و} \quad 1.92 - T = (0.200\ kg)a$$

وبجمع هاتين المعادلتين يحذف الشد T :

$$1.92\ N - 0.80\ N = 1.12\ N = (0.600\ kg)a$$

وهذا يعطى $a = 1.87\ m/s^2$. وبالتعويض فى أى من المعادلتين نحصل على T :

$$T - 0.80\ N = (0.400\ kg)(1.87\ m/s^2) = 0.748\ N$$

$$T = 0.80\ N + 0.748\ N = 1.55\ N$$

تحقق من صحة عدد الأرقام المعنوية فى النتيجة .

مثال 3-8 :

أثناء التحقيق فى حادث سيارة على طريق سريع لاحظت ضابطة الشرطة أن السيارة قد تركت أثر تزحلق على الطريق طوله 20.0 m ، وكان الطريق مرصوفاً بالخرسانة المستوية الجافة . افترضت الضابطة أن السائق قد ضغط بأقصى شدة على فرامل فى بداية التزحلق ، وكان حد السرعة فى تلك المنطقة من الطريق 50 km/h . هل تستطيع الضابطة فرض غرامة تخطى السرعة على السائق ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما المبدأ الذى يربط بين المعطيات عن سرعة السيارة قبل استخدام الفرامل ؟

الإجابة : معادلة الحركة التى تحتوى على v_0 ، v_f ، a ، x ؛ أى $v_f^2 = v_0^2 + 2ax$

حيث x مسافة التزحلق ؛ $v_f = 0$.

سؤال : ما عدد المجاهيل فى المسألة ؟

الإجابة : اثنان هما a و v_f .

سؤال : ما المبدأ الآخر الممكن تطبيقه والذى يحتوى على أحد هذين المجهولين على الأقل ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى للحركة . والعجلة هنا تسببها قوة احتكاك انزلاقى بين الإطارات والطريق .

سؤال : ما المعادلة التى تعطيها هذه المعلومات ؟

الإجابة : $ma = F_{net} = f$ ، حيث مقدار القوة يساوى $f = \mu_k F_N = \mu_k W_{car}$ وكتلة السيارة تساوى m .

سؤال : هل نحتاج إلى إيجاد كتلة السيارة ووزنها ؟

الإجابة : حيث أن $W_{car} = mg$ فإن m تظهر فى طرفى معادلة القانون الثانى فإنها تختصر .

سؤال : ما قيمة معامل الاحتكاك ؟

الإجابة : يبين الجدول 3-3 أن $\mu_k = 0.7$ للمطاط على الخرسانة الجافة .

الحل والمناقشة : المعادلتان اللتان نحصل عليهما فى هذه الحالة هما :

$$v_0^2 + 2ax = 0 \quad \text{و} \quad ma = \mu_k mg \quad \text{أو} \quad a = -\mu_k g$$

اتجاه العجلة هو الاتجاه $-x$ ، وعليه يجب استخدام الإشارات الصحيحة لمقادير المتجهات عند التعويض في معادلات المتجهات . أما المعادلة الثانية فتعطي :

$$a = -(0.7)(9.8\ m/s^2) -7\ m/s^2$$

وهكذا نجد أن :

$$v_0 = [2[7\ m/s^2)(20.0\ m)]^{1/2} = 17\ m/s$$

وبتحويل هذه الكمية إلى km/h نحصل على :

$$v_0 = (17\ m/s)(3600\ s/h)(1\ km/1000\ m) = 61\ km/h$$

أي أن السائق كان متخطيًا حد السرعة في لحظة استخدامه للفرامل .

3-9 الوزن وانعدام الوزن



شكل 18-3:
قراءة الميزان الزنبركي هي قوة شد الخطاف للدلو ، وهي تمثل الوزن الظاهري للجسم .

تشاهد أحيانًا ظاهرة فيزيائية مدهشة تسمى انعدام الوزن عندما تكون الأجسام متسارعة . ومع أننا سنؤجل مناقشة انعدام الوزن في السفن الفضائية أثناء الدوران في أفلاكها إلى ما بعد مناقشة الحركة في دائرة ، إلا أننا نناقش هنا أمثلة أخرى لانعدام الوزن . ويمكن تفهم هذه الظاهرة فهمًا عميقًا بدراسة حالة جسم معلق في سقف مصعد كما هو مبين بالشكل 18-3 . وفي هذا المثال تمثل قراءة الميزان الزنبركي ما يسمى عادة وزن الجسم . ونظرًا لأننا عرفنا الوزن سابقًا بأنه قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم ، يمكننا تسمية قراءة الميزان الزنبركي هنا **بالوزن الظاهري** للجسم .

يوضح المخطط البياني للجسم الحر المبين بالشكل 18-3ب القوى المؤثرة على الدلو وهما اثنتان فقط : قوة الجاذبية (وزن الدلو) W وقوة الشد إلى أعلى ، ولتكن T ، التي يشد بها الخطاف الدلو* . وحيث أن شد الخطاف إلى أعلى يساوي قراءة الميزان ، إذن الوزن الظاهري للدلو يساوي هذه القيمة .

الحالة 1 : المصعد ساكنًا

حيث أن $\mathbf{a}_y = 0$ في هذه الحالة ، تتحول المعادلة $\Sigma \mathbf{F}_y = m\mathbf{a}_y$ إلى

$$\Sigma \mathbf{F}_y = 0 \quad \text{أو} \quad T - W = 0$$

إذن $T = W$ وتكون قراءة الميزان W ، هذا يعني أن الوزن الظاهري للدلو يساوي قوة الجاذبية المؤثرة عليه .

الحالة 2 : المصعد متحركًا بسرعة ثابتة

حيث أن السرعة ثابتة تكون العجلة صفرًا ، ومن ثم فإن التحليل السابق استخدامه في

* أهملنا الوزن الصغير للخطاف .

الحالة 1 ينطبق هنا أيضًا وتكون قراءة الميزان W . أى أن الوزن الظاهرى يساوى الوزن الفعلى .

الحالة 3 : المصعد متسارعًا إلى أعلى

لنرمز للعجلة بالرمز $\mathbf{a}_y$. فإذا اعتبرنا الاتجاه الرأسى إلى أعلى اتجاهًا موجبًا فإن العلاقة $\Sigma \mathbf{F}_y = m\mathbf{a}_y$ تأخذ الصورة :

$$T - W = m\mathbf{a}_y$$

ومنه نجد أن :

$$\text{الوزن الظاهرى} = T = W + m\mathbf{a}_y$$

ويكون الوزن الظاهرى للدلو هنا أكبر من قيمته عند السكون . هذا يعنى أن الخطاف يجب أن يعادل قوة الجاذبية وأن يعطى بالإضافة إلى ذلك قوة إضافية غير متزنة قدرها $T - W$ إلى أعلى حتى يسبب العجلة الرأسية إلى أعلى (لاحظ مدى أهمية تعريف اتجاه موجب للقوى والعجلة) .

الحالة 4 : المصعد متسارعًا إلى أسفل

إذا اعتبرنا الاتجاه إلى أعلى موجبًا كما فى الحالة السابقة تصبح العجلة سالبة هنا .

ومن العلاقة $\Sigma \mathbf{F}_y = m\mathbf{a}_y$ نجد أن :

$$T - W = -m\mathbf{a}_y$$

ومنه :

$$\text{الوزن الظاهرى} = T = W - m\mathbf{a}_y$$

من الواضح أن الوزن الظاهرى للدلو فى هذه الحالة أقل من قوة الجاذبية المؤثرة عليه .

من الحالات الهامة أيضًا حالة السقوط الحر للجسم حيث تكون عجلة الحركة مساوية لعجلة الجاذبية ، $\mathbf{a}_y = g$. وحيث أن $W = mg$ فإن :

$$T = mg - mg = 0$$

وبذلك يظهر الدلو « عديم الوزن » . ما تفسير ذلك السلوك فى مثالنا عن المصعد ؟ عندما يكون الدلو فى حالة سقوط الحر يكون الميزان فى نفس الحالة ، ولن يستطيع الخطاف المتصل بالدلو التأثير عليه بقوة إلى أعلى تحفظه فى مكانه ، لهذا السبب تهبط قراءة الميزان إلى الصفر ويظهر الدلو عديم الوزن . هذه النتيجة صحيحة أيضًا حتى إذا كنا نستخدم ميزانًا قبانيًا لقياس وزن الدلو . ففى ظروف السقوط الحر يكون طرفا الميزان (والدلو الموضوع عليه) متحركين بنفس العجلة g ، ولن يحتاج اتزان قضيب الميزان إلى أى أثقال .

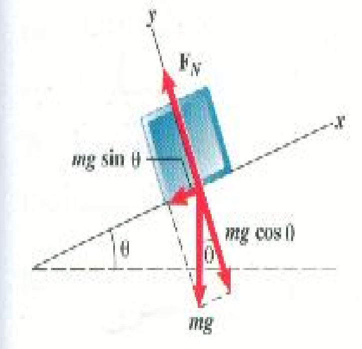
بالرغم من أن هذا الموقف افتراضى فإنه يوضح بالتأكيد أن الوزن الظاهرى لجسم

يعتمد وبصورة حرجة على عجلته . وعمومًا يمكن تلخيص شرط انعدام الوزن أثناء السقوط الحر كما يأتي :

يكون الجسم عديم الوزن (ذى وزن ظاهرى يساوى الصفر) طالما كانت قوة الجاذبية هى القوة الوحيدة المؤثرة على الجسم .

وسوف نرى فى الفصل السابع أن هذا الشرط ينطبق أيضًا على الأقمار الصناعية وجميع محتوياتها فى المدارات الجذبية حول الأرض (أو الكواكب أخرى على السواء) . إذن ، مع أننا نعرف الوزن بأنه قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم ، يجب أن نتذكر أن الوزن المقاس ، والذى نسميه الوزن الظاهرى ، **يختلف عن هذه القوة إذا كان الجسم الذى يقوم بوزنه متسارعًا** . ولكن هذه العجلة تكون صفرًا فى غالبية الحالات التى نتعرض لها .

3-10 الحركة على مستوى مائل



شكل 19-3:

عند تناول حركة جسم على مستوى مائل من المناسب أن يؤخذ المحوران x و y فى الاتجاه الموازى للمستوى المائل والعمودى عليه ، على الترتيب . بعدئذ تحلل القوى إلى مركباتها فى اتجاه هذين المحورين .

الحركة على مستوى مائل ، أو منحدر ، نوع هام من الحركة فى بعد واحد ، ويمثل الشكل 19-3 منحدرًا يصنع زاوية قدرها θ بالنسبة للأفقى . وزن الجسم الموضوع على المنحدر mg ما زال رأسيًا إلى أسفل ، كما أن القوة العمودية التى يؤثر بها المنحدر على الجسم (طبقًا للتعريف) تكون عمودية على المنحدر . وحيث أن الحركة مقيدة بحيث تحدث على استقامة المنحدر ، فإنه من الأنسب اختيار المحور x **على استقامة المنحدر** والمحور y عموديًا عليه .

ولمواصلة المناقشة بالطريقة التى اتبعناها سابقًا يجب تحليل جميع القوى الممثلة فى المخطط البيانى للجسم الحر إلى مركبات موازية لهذين المحورين . لاحظ فى الشكل أن الوزن mg قد تم تحليله إلى المركبة x وتساوى $mg \sin \theta$ على استقامة المنحدر إلى أسفل (فى الاتجاه $-x$) والمركبة y وتساوى $mg \cos \theta$ فى الاتجاه $-y$. هل ترى لماذا كانت الزاوية θ فى الوضع المبين فى هذا الشكل ؟ أما القوة F_N فتكون كليًا فى الاتجاه $+y$. وإذا وجد احتكاك فإنه يتحتم أن يكون فى الاتجاه x ، موجبًا أو سالبًا بحيث يكون دائمًا فى عكس اتجاه حركة الجسم (أو ميل الجسم للحركة فى حالة السكون) .

لنلخص الشروط التى تحكم المحورين :

1 ـ حيث أن الحركة فى الاتجاه العمودى على المنحدر محظورة ، يجب أن يكون مجموع القوى فى الاتجاه y صفرًا طبقًا لقانون نيوتن الأول .

2 ـ الحركة تكون كلية على استقامة الاتجاه x ويحكمها قانون نيوتن الثانى .



الحركة على مستوى مائل .

مثال توضيحى 3-3

افترض أن الاحتكاك مهمل وأن القوى الوحيدة المؤثرة على الجسم هى المبينة بالشكل 19-3 . (أ) احسب الزمن اللازم لانزلاق الجسم إلى أسفل على منحدر يميل بزاوية

قدرها $40°$ مسافة قدرها $1\ m$. (ب) أوجد سرعة الجسم عند قاع المنحدر .

استدلال منطقي: لاشتقاق المعادلات الملائمة يجب تطبيق الشرطيين السابق ذكرهما عاليه . في الاتجاه العمودي على المنحدر يجب أن يكون $F_N = mg\ \cos\theta$ (وليس mg) . أما صافي القوة في تجاه المنحدر فيكون $mg\ \sin\theta$ إلى أسفل ، وهذه القوة تسبب تسارع الجسم في ذلك الاتجاه بعجلة قدرها :

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{mg\ \sin\theta}{m} = g\ \sin\theta$$

هذه العجلة يمكن استخدامها في نفس معادلات الحركة في بعد واحد والتي استخدمت سابقاً :

$$v_f^2 = v_0^2 + 2ax = 0 + 2(g\ \sin\theta)x$$

حيث يختار الاتجاه $+x$ موازيًا للمنحدر إلى أسفل في اتجاه الحركة . وأيضًا ، بوضع $v_0 = 0$ نجد أن :

$$x = 0 + \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}(g\ \sin\theta)t^2$$

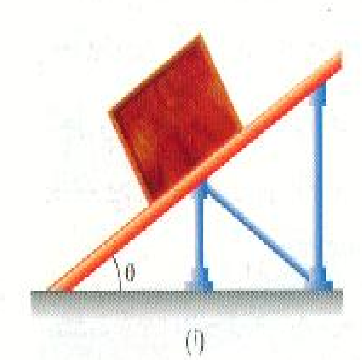
و :

$$v_f = 0 + at = (g\ \sin\theta)t$$

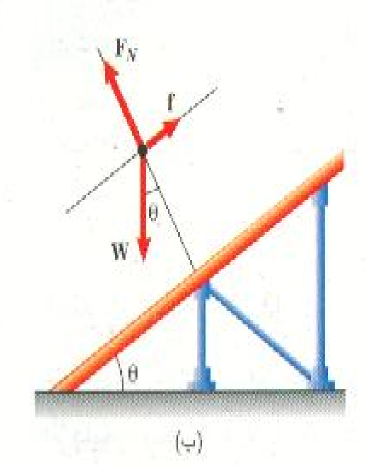
بذلك تكون إجابتا السؤالين كما يلي :

(أ)
$$t = \frac{v_f}{g\ \sin 40} = 0.564\ s$$

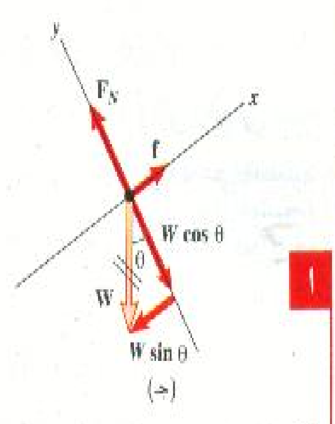
(ب)
$$v_f = [2(9.8\ m/s^2)(\sin 40°)(1\ m)]^{1/2} = 3.55\ m/s$$



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 20-3:

مثال 9-3 :

وضع صندوق على مستوى مائل كما هو مبين بالشكل 20-3أ . (أ) أوجد التعبير العام ، بدلالة m ، θ ، μ_s ، لأكبر زاوية θ تسمح للصندوق أن يظل ساكنًا . (ب) أوجد التعبير العام لعجلة الصندوق على المستوى المائل إلى أسفل عندما تكون زاوية ميله أكبر من القيمة السابقة :

استدلال منطقي الجزء (أ):

سؤال : ما شكل المخطط البياني للجسم الحر الخاص بالصندوق ؟

الإجابة : هذا المخطط يبين بالشكل 20-3ب . تذكر أن الاحتكاك يؤثر دائما في اتجاه موازٍ للسطحين المتلامسين وفي عكس اتجاه الحركة . ومن ثم يكون الاحتكاك في هذه الحالة إلى أعلى على المنحدر .

سؤال : ما الشرط الضرورى تحققه حتى يظل الصندوق فى مكانه ؟

الإجابة : صافى القوة المؤثرة عليه يجب أن يكون صفرًا . هذا يعنى أن كلاً من المركبتين x و y لصافى القوة يجب أن يساوى صفرًا .

سؤال : أى المعادلات يعطى هذا الشرط ؟

الإجابة : فى الاتجاه الموازى للمنحدر $mg \sin \theta = f$.

فى الاتجاه العمودى على المنحدر $F_N = mg \cos \theta$.

سؤال : بماذا تتعين قوة الاحتكاك الاستاتيكى f ؟

الإجابة : تتعين f بقوة التضاغط F_N بين السطحين المتلامسين . ويمكن أن تأخذ f أى قيمة ضرورية للاتزان مع $mg \sin \theta$ وإلى قيمة عظمى قدرها $\mu_k F_N$.

الحل والمناقشة : عندما تكون قيمة الزاوية أكبر ما يمكن يجب أن تتساوى $f_c = \mu_s F_N$ بالكاد مع مركبة الوزن فى اتجاه المستوى إلى أسفل $mg \sin \theta_c$. إذن :

$$\mu_s F_N = \mu_s \; mg \cos \theta_c = mg \sin\theta_c$$

وبقسمة طرفى المعادلة على $mg \cos \theta_c$ نجد أن :

$$\frac{\sin \theta_c}{\cos \theta_c} = \tan \theta_c = \mu_s$$

وعليه فإن أكبر زاوية ، وتسمى **زاوية السكون** ، تكون :

$$\theta_c = \tan^{-1} \mu_s$$

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ما الخاصية الفيزيائية التى تتغير عند زيادة زاوية الميل عن θ_c ؟

الإجابة : يتغير الاحتكاك الاستاتيكى إلى احتكاك ديناميكى . إذن .

$$f = \mu_k mg \;\cos \theta$$

عندما تكون $\theta > \theta_c$

سؤال : ما قيمة صافى القوة فى اتجاه المنحدر عندما يبدأ الصندوق فى الانزلاق ؟

الإجابة : هذا يتوقف على اختيارنا للاتجاه الموجب . فإذا اعتبرنا الاتجاه الموازى للمنحدر إلى أسفل موجبًا فإن :

$$F_{net} = W \sin \theta - f = mg \sin \theta - \mu_k mg \;\cos \theta$$

سؤال : ما المبدأ الذى يمكننا من حساب العجلة من المعطيات ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى :

$$mg \sin \theta - \mu_k mg \;\cos \theta = ma$$

اتجاه جميع هذه الكميات إلى أسفل على استقامة المنحدر .

الحل والمناقشة : بحل هذه المعادلة بالنسبة إلى a نحصل على :

$$a = g(\sin\theta - \mu_k \cos\theta)$$

لاحظ أن الكتلة قد اختصرت . هذا يعنى أن عجلة كل الكتل تكون واحدة طالما كانت معاملات الاحتكاك واحدة . لنختبر مضمون هذه النتيجة العامة فى بعض الحالات الخاصة الهامة :

1 ـ **غياب الاحتكاك** . فى هذه الحالة يكون $\mu_k = 0$ و $a = mg\sin\theta$ ، وهى نفس النتيجة السابق الحصول عليها فى المثال التوضيحى 1-3 .

2 ـ **المنحدر الرأسى** . إذا كان $\theta = 90°$ فإن $\sin\theta = 1$ ، $\cos\theta = 0$. ومن ثم فإن $a = g$ وهى حالة السقوط الحر كما هو متوقع .

من المفيد دائمًا دراسة الحالات الحدية للحل الجبرى العام .

مثال 10-3 :

يراد دفع سيارة كتلتها 1200 kg على تل يرتفع بمقدار 4.0 m كل 40 m بعجلة قدرها $0.50\ m/s^2$ كما هو مبين بالشكل 21-3أ . ما مقدار قوة الدفع على السيارة حتى تتحرك بهذه العجلة ؟ إهمل الاحتكاك .

استدلال منطقى :

سؤال : فيم يختلف هذا الموقف عن الأمثلة السابقة ؟

الإجابة : فى هذه المرة توجد قوة مسلطة P (من كلمة push بمعنى دفع) فى اتجاه المستوى المائل إلى أعلى .

سؤال : لإيجاد مركبتى وزن السيارة يلزم معرفة زاوية ميل التل . ما العلاقة بين المسافات المعطاة فى الرسم وهذه الزاوية ؟

الإجابة : من تعريف جيب الزاوية نجد أن :

$$\sin\theta = \frac{4.0\ m}{40\ m} = 0.10$$

إذن : $\theta = \sin^{-1} 0.10 = 5.7°$. ويمثل الشكل 21-3ب المخطط البيانى للجسم الحر بالنسبة للسيارة .

سؤال : ما المبدأ الذى يربط الدفع P بالعجلة ؟

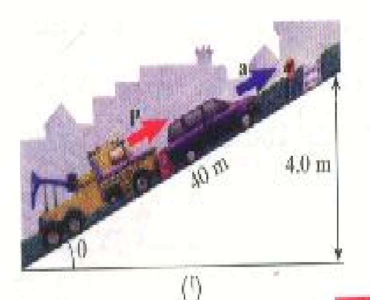
الإجابة : قانون نيوتن الثانى بحيث يطبق على الحركة فى اتجاه مواز للتل .

سؤال : ما المعادلة الممكن استنتاجها من هذا المبدأ ؟

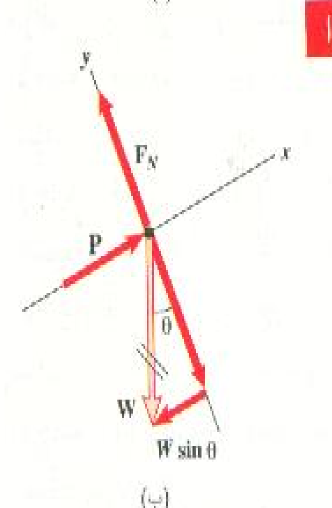
الإجابة : باختيار اتجاه الصعود على التل اتجاهًا موجبًا للعجلة نجد أن :

$$P - mg\sin\theta = ma$$

(حيث اعتبرنا أن الاحتكاك مهمل) .



(أ)



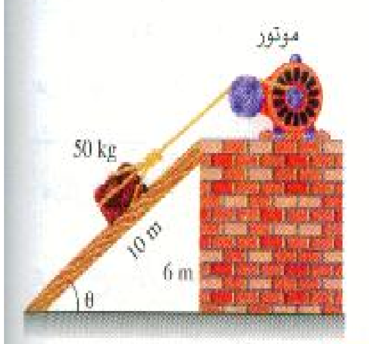
(ب)

شكل 21-3:
مركبة الوزن المؤثرة فى اتجاه مواز للتل إلى أسفل تتعادل مع جزء من قوة الدفع P ، وتنتج العجلة الموازية للتل إلى أعلى نتيجة للجزء المتبقى من P .

الحل والمناقشة : بحل المعادلة السابقة بالنسبة إلى P نجد أن :

$$P = ma + mg\sin\theta$$
$$= (1200\ \text{kg})(0.50\ \text{m/s}^2) + (1200\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(0.10)$$
$$= 600\ \text{N} + 1200\ \text{N} = 1800\ \text{N}$$

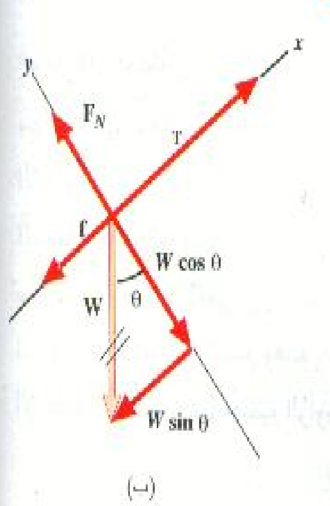
لاحظ أننا لا نحتاج إيجاد قيمة θ . كل ما استخدمنا هو النسبة بين ضلعى المثلث فى الشكل 21-3 . أما إذا طلب إيجاد القوة العمودية F_N فسوف نحتاج معرفة قيمة θ لحساب $\cos\theta$. هذا ويبين الحدان فى الحل قيمة الدفع اللازم ، حيث تقوم القوة 1200 N لمجرد التعادل مع مركبة وزن السيارة الموازية للتل إلى أسفل ، بينما تقوم القوة الثانية وقدرها 600 N بإنتاج العجلة المطلوبة .





مثال 11-3 :

يشد موتور قالبًا كتلته 50 kg على مستوى مائلاً صعودًا كما هو مبين بالشكل 22-3 . فإذا كان معامل الاحتكاك بين القالب والتل 0.70 ؛ فما قيمة الشد فى الحبل بفرض أن القالب يتحرك بسرعة ثابتة المقدار ؟



شكل 22-3:
حيث أن القالب يتحرك صاعدًا على المستوى المائل بسرعة ثابتة فإن الشد الناتج من الموتور يجب أن يتزن تمامًا مع مجموع قوة الاحتكاك ومركبة الوزن الموازية للمستوى المائل إلى أسفل .

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يعنى الشرط المذكور بأن مقدار السرعة ثابت ؟

الإجابة : هذه طريقة للقول أن العجلة تساوى صفرًا .

سؤال : ما هو المبدأ الذى ينطبق على المسألة إذن ؟

الإجابة : قانون نيوتن الأول : $F_{\text{net}} = 0$ فى الاتجاهين الموازى للمستوى المائل والعمودى عليه . ذلك أن القانون الأول يتعامل مع السرعة الصفرية ببساطة باعتبارها مثالاً للشرط الأعم بأن السرعة ثابتة .

سؤال : ما المعادلات التى يعطيها القانون الأول فى هذه الحالة ؟

الإجابة : بالاستعانة بالخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالقالب (شكل 21-3ب) نحصل على :

(للاتجاه الموازى للمستوى المائل) $T - W\sin\theta - F = 0$.

(للاتجاه العمودى على المستوى المائل) $F_N - W\cos\theta = 0$.

سؤال : هل يمكن تعيين القوة f من المعطيات ؟

الإجابة : حيث أن القالب ينزلق ، إذن :

$$f = \mu_k F_N = \mu_k mg\cos\theta$$

الحل والمناقشة : من المعادلة الخاصة بالاتجاه الموازى للمستوى المائل نحصل على :

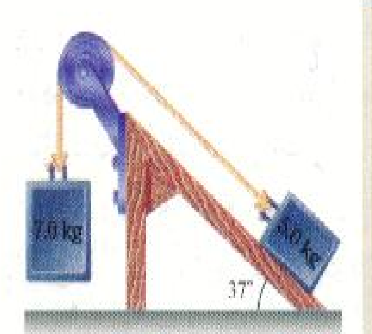
$$T = (0.70)(950\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(8/10) + (50\text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(6/10)$$

هل يمكنك أن ترى لماذا يمثل الكسران جيب الزاوية وجيب تمامها ؟ وعليه فإن الإجابة النهائية هي :

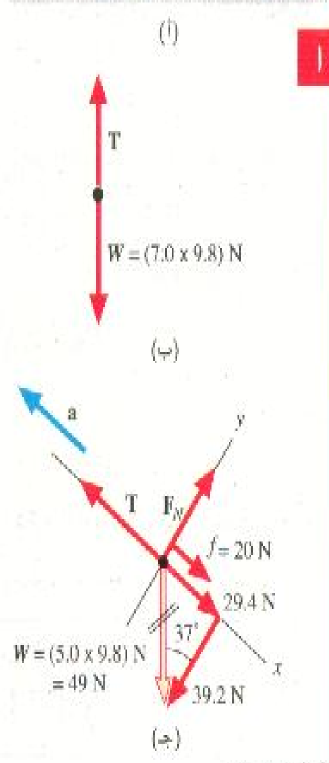
$$T = 270\ \text{N} + 290\ \text{N} = 560\ \text{N}$$

مثال3-12 :

وضعت مجموعة من قالبين على مستوى مائل زاوية ميله °37 كما هو مبين بالشكل 23-3أ . بفرض أن معاملي الاحتكاك بين المستوى المائل والقالب ذى الكتلة 5 kg هما $\mu_s = 0.70$ ، $\mu = 0.50$ ؛ (أ) إثبت أن المجموعة سوف تبدأ فى الانزلاق بمجرد تركها ، (ب) ما قيمة عجلتى القالبين ؟



(أ)



شكل 23-3:
(أ) القالب ذو الكتلة 7 kg يسقط رأسيًا إلى أسفل جاذبًا القالب ذا الكتلة 5 kg إلى أعلى على المستوى المائل . (ب) المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالقالب ذى الكتلة 7 kg . (جـ) المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالقالب ذى الكتلة 5 kg .

استدلال منطقى الجزء (أ):

سؤال : كيف يمكن إثبات أن المجموعة سوف تبدأ فى الانزلاق ؟

الإجابة : افترض أنه سوف يلتصق ثم إثبت أن القيم العددية الناتجة مستحيلة وغير متسقة .

سؤال : ما شكل المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بكل من القالبين ؟

الإجابة : كما هو موضح بالشكلين 23-3ب ، جـ . عند تناول الحالة الاستاتيكية تكون f هى قوة الاحتكاك الاستاتيكى .

سؤال : ما المعادلات التى تنطبق على الحالة الاستاتيكية ؟

الإجابة : بالنسبة للقالب ذى الكتلة 7 kg :

$$T - (7.0\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 0$$

ومنه نجد مباشرة أن $T = 69$ N . وبالنسبة للقالب ذى الكتلة 5 kg :

$$T - f - (5.0\ \text{kg})\ (9.8\ \text{m/s}^2)(\sin 37°) = 0$$

وبوضع $T = 69$ N تتحول هذه المعادلة إلى الصورة :

$$f = 69\ \text{N} - 29\text{N} = 40\ \text{N}$$

سؤال : كيف نعلم ما إذا كانت قوة احتكاك بهذا القدر ممكنة أم غير ممكنة ؟

الإجابة : القيمة العظمى للقوة f هو f_c التى تعطى بالعلاقة :

$$f_c = \mu_s F_N = \mu_s mg \cos 37°$$

الحل والمناقشة: من المعادلة الأخيرة نجد أن $f_c = (0.70)(49\ \text{N})(0.80) = 27\ \text{N}$ بينما شرط الالتصاق يتطلب أن تكون $f_c = 40$ N . وهكذا يمكن استنتاج أن الالتصاق غير ممكن فى هذا الموقف وأن المجموعة سوف تنزلق .

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ماذا يتغير فى الفرض السابق بمجرد أن يبدأ القالبان فى الانزلاق ؟

الإجابة : تعطى f الآن بالمعادلة $f = \mu_k mg \cos 37°$ ، والشد T لن يكون مساويًا لوزن القالب ذى الكتلة 7 kg .

سؤال : ما المبدأ الذى ينطبق الآن ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثانى مع تطبيقه على كل قالب على حدة .

سؤال : ما هى المعادلات الناتجة ؟

الإجابة : بالنسبة للقالب ذى الكتلة 7 kg :

$$69\ \text{N} - T = (7.0\ \text{kg})a$$

وبالنسبة للقالب ذى الكتلة 5 kg :

$$T - (49\ \text{N})(0.60) - (0.50)(49\ \text{N})(0.80) = (5.0\ \text{kg})a$$

الحل والمناقشة : لاحظ مرة ثانية أن القالبين لهما نفس العجلة . وكما فعلنا فى الأمثلة السابقة ، بجمع المعادلتين يمكن حذف T وبذلك يمكن إيجاد a :

$$69\ \text{N} - (49\ \text{N})(0.60) - (0.50)(49\ \text{N})(0.80) = (7.0\ \text{kg} + 5.0\ \text{kg})a$$

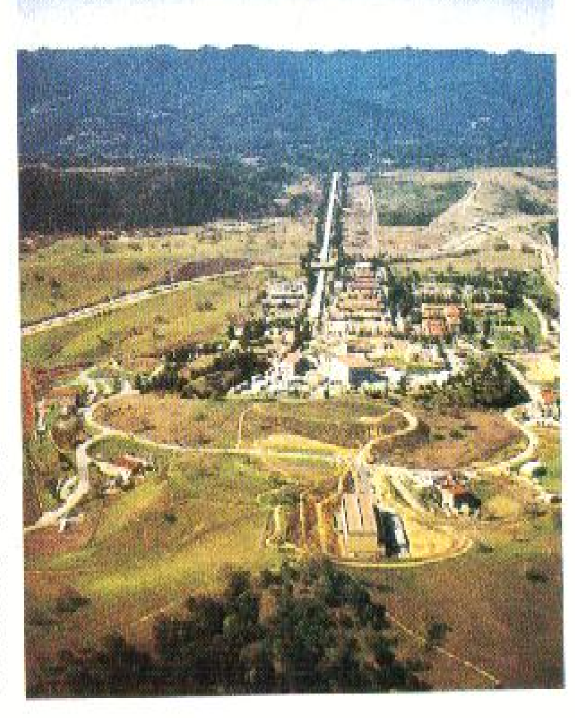
ومنه نجد أن :

$$a = \frac{19.6\ \text{N}}{12\ \text{kg}} = 1.6\ \text{m/s}^2$$

وعليه التعويض بهذه القيمة فى أى من معادلتى القانون الثانى للحصول على الشد ، وستجد عندئذ أن $T = 57\ \text{N}$.

3-11 وجهة نظر حديثة : الكتلة عند السرعات العالية

يشار إلى الفيزياء كما كانت معروفة قرب نهاية القرن التاسع عشر باسم الفيزياء الكلاسيكية . وكان المعتقد فى ذلك الوقت أن جميع المبادئ الأساسية الضرورية لوصف الظواهر الفيزيائية قد تم اكتشافها كلها . ولكن مع بداية القرن العشرين بدأ الفيزيائيون فى إجراء تجاربهم على الذرة ، وكان من أهم نتائج هذه الدراسة اكتشاف الجسيمات فائقة الصغر الداخلة فى تركيب الذرة . ولكن المبادئ الفيزيائية للقرن التاسع عشر كانت قاصرة عن تفسير كيفية سلوك هذه الجسيمات . كذلك قام إينشتين بنشر نظريته النسبية التى تعتبر تحويرًا لقوانين نيوتن عندما تقترب سرعة الجسيمات من سرعة الضوء . وباتساع آفاق التجربة العملية وامتدادها إلى الظواهر الأصغر والأسرع أصبحت الحاجة أكثر إلحاحًا لتحويرات ثورية فى الفيزياء الكلاسيكية حتى يمكن تفسير النتائج . هذه التطويرات الجديدة تسمى الفيزياء **الحديثة** ، بالرغم من أنها بدأت منذ حوالى قرن كامل .

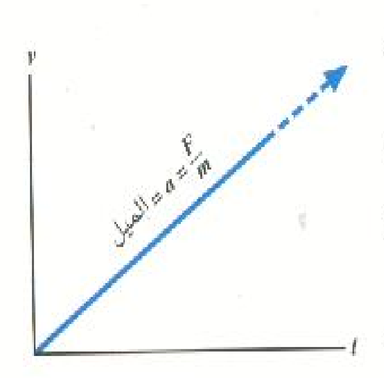


معجل ستانفورد الخطى وطوله ميلان تكتسب الإلكترونات فى هذا المعجل سرعات تقترب من سرعة الضوء ، ولكنها لا يمكن أن تزيد عنها . إن سلوك الجسيمات عالية السرعة فى معجلات الجسيمات مثل هذا المعجل تتفق مع نظرية أينشتين النسبية .

إن الموضوع الأساسى فى هذا المقرر هو الفيزياء الكلاسيكية التى مازلت تحتفظ بقيمتها كأداة سليمة قوية لوصف العالم فى كثير من النواحى العملية . من الضرورى أيضًا فهم المبادئ الكلاسيكية أولاً حتى يمكن فهم واستيعاب التحويرات الحديثة بشكل كامل . ومع ذلك فإننا سنتقدم فى متن هذا الكتاب بعض وجهات النظر الحديثة حينما تكون متصلة بالموضوعات الكلاسيكية دون إدعاء بأننا نتناولها بشكل كامل صارم . وسوف نعالج هذه الموضوعات الحديثة ببعض التفصيل فى الفصول الأخيرة .

سنقوم فى رحلتنا الجانبية الأولى فى عالم الفيزياء الحديثة بالتعرف على كيفية سلوك كتلة الجسم عند السرعات الفائقة .

يظهر من تعريف الكتلة واستخدامها فى قانون نيوتن للحركة ما يعنى أن الكتلة خاصية متأصلة ثابتة من خواص الجسم . ورأينا فى وزن الجسم أنه قد يتغير من حالة إلى أخرى ، ويعتمد هذا التغير على عجلة الجسم أو التغيرات فى قوة الجاذبية المؤثرة عليه ، ولكننا كنا نفرض أن الكتلة تظل ثابتة دائمًا . والواقع أن الكتلة بالنسبة إلى نيوتن وغيره من الفيزيائيين الكلاسيكيين كانت مقياسًا لكمية المادة التى يحتويها الجسم ، ومن ثم فإنها ثابتة بالتعريف .



شكل 3-24:
منحنى v مقابل t عند ثبوت القوة طبقًا لقانون نيوتن الثانى . الميل الثابت للمنحنى يعنى زيادة ثابتة غير محدودة فى v طالما استمر تأثير القوة F .

وباعتبار وجهة النظر هذه للكتلة بالإضافة إلى العلاقة $v = at$ يمكننا ملاحظة أن قانون نيوتن الثانى يتنبأ أن سرعة الجسم تزداد بلا حدود طالما استمر صافى القوة فى إمداد العجلة إلى الجسم :

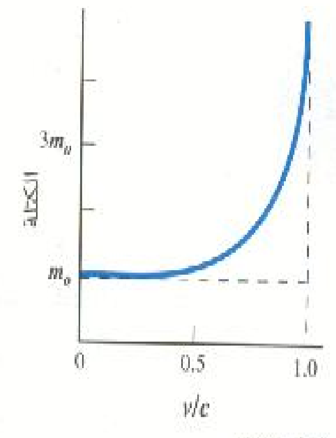
$$v = at = \frac{F}{m}t \tag{3-4}$$

ويوضح الشكل 24-3 أن السرعة v تزداد زيادة خطية مع الزمن t طالما استمر تأثير القوة F .

وفي بداية القرن العشرين قدم ألبرت أينشتين نظرية النسبية التي بدت متناقضة مع بعض الأفكار الأساسية للفيزياء الكلاسيكية . ويتمثل أحد هذه التناقضات في تنبؤه أن أى جسم لا يمكن أن يتسارع إلى سرعات أكبر من سرعة الضوء (ورمزها c) ، في حين أنه ليس في قوانين نيوتن ما يضع أى حد علوى كهذا لسرعة الأجسام ($c = 300,000$ km/s أو أكثر قليلاً من 186,000 mi/s) . وقد أثبتت التجارب صحة تنبؤ أينشتين بالفعل فالإلكترونات مثلاً أمكن تعجيلها في إحدى التجارب باستخدام قوى كبيرة ولأزمنة كافية لإعطائها سرعات أكبر كثيرًا من سرعة الضوء بفرض صحة قوانين نيوتن ، ولكن سرعاتها المقاسة أثبتت أن الإلكترونات تتحرك بسرعة قدرها $0.99999992\,c$ « فحسب » .

ولكي نفهم هذا التناقض الواضح ونضع تفسيرًا له من الضرورة التعرف على وجهة نظر أينشتين في الكتلة . تتنبأ نظرية النسبية أن كتلة الجسم تزداد بزيادة سرعته طبقًا للعلاقة الرياضية :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (3\text{–}5)$$



شكل 25-3:
كتلة الجسم المتحرك تقترب من مالانهاية عندما تقترب سرعة الجسم من سرعة الضوء .

حيث m_0 تسمى كتلة السكون أو **الكتلة السكونية** وهي تكافئ الكتلة « العادية » التي استخدمناها خلال الفصل . ويمكن فهم ما تعنيه المعادلة (5-3) برسم منحنى m مقابل v/c (شكل 25-3) وكذلك بدراسة المعادلة (5-3) . تبين هذه المعادلة أنه طالما كانت v أصغر كثيرًا من c ، بحيث يمكن اعتبار $v^2/c^2 \ll 1$ ، فإن الجذر التربيعي في الطرف الأيمن للمعادلة يساوي 1 عمليًا ، وهذا يعني أن $m = m_0$. هذا الشرط يناظر الجزء الأفقي أساسًا في المنحنى الموضح في شكل 25-3 والذي يمتد من $v/c = 0$ إلى حوالي $v/c = 0.4$. وفقط عندما تقترب v من c تبدأ m في الاختلاف عن m_0 اختلافًا كبيرًا . لاحظ أنه عندما تقترب v من c (أى عندما تقترب v/c من 1) سوف يصبح المقام في المعادلة (5-3) صفرًا ، وهذا يعني أن الكتلة ستصبح **لا نهائية** من الكبر .

هل يعني هذا أن الجسم يزداد كبرًا بطريقة ما أنه يجمع المزيد من المادة ؟ لا على الإطلاق . ولكي نفهم ما يحدث علينا الرجوع إلى مفهوم الكتلة كمقياس للقصور الذاتي للجسم ؛ أى « مقاومة » الجسم للتغيرات في السرعة عندما تؤثر القوة عليه . وفي إطار هذا المفهوم تفيدنا نظرية النسبية أن الجسم عندما تقترب سرعته من سرعة الضوء سوف يحتاج المزيد و المزيد من القوة لتغيير سرعته ، أى أن قصوره الذاتي سوف يزداد .

هل نستنتج من ذلك أن نيوتن كان مخطئًا ؟ قبل الإجابة عن هذا السؤال علينا أن نتذكر أن السرعات التي نتعامل معها في كل خبراتنا العملية (وخبرات نيوتن أيضًا) صغيرة جدًا بالنسبة إلى c ؛ وقوانين نيوتن صالحة جدًا في جميع هذه الحالات . كذلك فإن معادلة أينشتين متفقة تمامًا مع قوانين نيوتن عند السرعات « المنخفضة » . ويظهر جمال معادلة أينشتين في أنها توضح صراحة كيف يلزم تعديل وتحوير قوانين نيوتن

عندما تكون السرعات فى مدى أبعد من خبرتنا اليومية .

ويمكننا أن نرى بالضبط كيف يتحور قانون نيوتن الثانى عندما تكون القوة المؤثرة ثابتة . كذلك فإنه يتنبأ بأن حد السرعة هو c وهو ما يمكن إثباته بالتعويض عن m من المعادلة (3-5) فى المعادلة (3-4) :

$$v = \frac{F}{m}t = \frac{Ft}{m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{Ft}{m_0}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

لاحظ أن المعادلة تحتوى الآن على v فى كلا طرفيها ؛ ولذا يجب إعادة ترتيب الحدود حتى يمكن حلها بالنسبة إلى v . علينا أولاً تربيع كلا الطرفين للتخلص من علامة الجذر التربيعى :

$$v^2 = \left(\frac{Ft}{m_0}\right)^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \left(\frac{Ft}{m_0}\right)^2 - \left(\frac{Ft}{m_0 c}\right)^2 v^2$$

والآن نقوم بتجميع الحدود المحتوية على v^2 ثم أخذ v^2 كعامل مشترك :

$$v^2\left[1 - \left(\frac{Ft}{m_0 c}\right)^2\right] = \left(\frac{Ft}{m_0}\right)^2$$

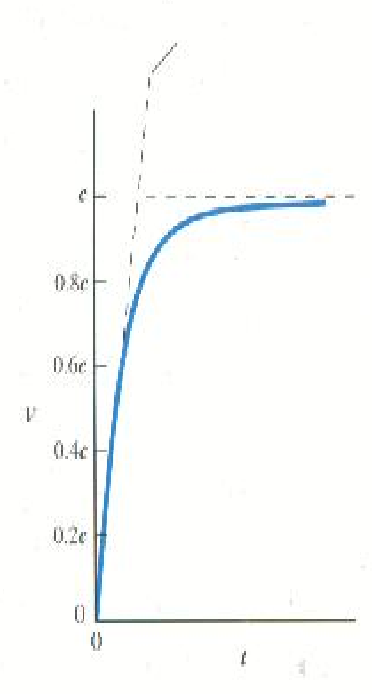
وأخيرا بأخذ الجذر التربيعى للنتيجة :

$$v = \frac{Ft/m_0}{\sqrt{1 + (Ft/m_0 c)^2}} \qquad (3\text{-}6)$$

المعادلة السابق تبين أن اعتماد السرعة على زمن تأثير القوة أكثر تعقيدًا مما سبق ، إذ أنها تحتوى على t فى البسط والمقام على السواء . ويمثل الشكل 26-3 منحنى v مقابل t طبقًا للمعادلة (3-6) . من هذا نرى أن سلوك v عند السرعات المنخفضة سلوك خطى ميله يساوى F/m_0 ، وهو العجلة فى قانون نيوتن الثانى بالضبط . لاحظ أنه بزيادة الزمن زيادة كبيرة ، بحيث يمكن إهمال الوحدة فى الكمية الموجودة تحت الجذر التربيعى ، نجد أن **القيمة الحدية** للسرعة v تكون :

$$v\,(\text{as } t \to \infty) = \frac{Ft/m_0}{\sqrt{(Ft/m_0 c)^2}} = c$$

هذا وتتنبأ نظرية النسبية لأينشتين أيضًا أن قياسات الكميتين الأساسيتين الأخريين فى الميكانيكا ، وهما الطول والزمن ، يتغيران عند السرعات العالية جدًا . وسوف تناقش هذه التنبؤات المذهلة للنسبية بشكل أكثر تفصيلاً فى الفصل السادس والعشرين .



شكل 26-3:
السلوك النسبوى للسرعة v كدالة فى الزمن t تحت تأثير قوة ثابتة . لاحظ أن الميل الابتدائى هو العجلة « الكلاسيكية » F/m_0 . وعندما تقترب v من c يقل الميل ، وهو ما لا يعنى زيادة فى الكتلة .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل ينبغي أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) القصور الذاتي ، (ب) الكتلة ، (جـ) صافي القوة ، (د) النيوتن ، (هـ) القوة العمودية ، وقوة الاحتكاك ، (ز) معامل الاحتكاك .

2 ـ كتابة قانون نيوتن الأول وضرب بعض الأمثلة للتوضيح .

3 ـ كتابة قانون نيوتن الثاني بالألفاظ وفي صورة معادلة . تحديد معنى a ، m ، F_{net} . شرح أهمية عزل الجسم عند تطبيق هذا القانون .

4 ـ كتابة قانون نيوتن الثالث وإيجاد قوتي الفعل ورد الفعل في مواقف بسيطة .

5 ـ التعرف على القوة المؤثرة على جسم في مواقف بسيطة ورسم المخطط البياني للجسم الحر. من الضروري أن تتضمن المواقف قوى الاحتكاك والتضاغط والشد .

6 ـ إيجاد القوة العمودية التي يؤثر بها سطح صلب على جسم متلامس معه .

7 ـ ربط قانون نيوتن الثاني مع معادلات الحركة ذات العجلة المنتظمة لتعيين حركة الأجسام الواقعة تحت تأثير قوى ثابتة .

8 ـ التعرف على قوة الاحتكاك (مقدارًا واتجاهًا) المؤثرة على جسم في مواقف مختلفة بمعلومية معاملات الاحتكاك بين الجسم والسطح .

9 ـ ذكر العلاقة بين كتلة ووزن جسم . كتابة شرط تساوي الوزن الظاهري لجسم وقوة الجاذبية المؤثرة عليه . كتابة شرط انعدام وزن الجسم .

10 ـ تحليل القوى المؤثرة على جسم يحمله مستوى مائل إلى مركبات موازية للمستوى المائل ومركبات عمودية . تطبيق قانون نيوتن الثاني على جسم فوق مستوى مائل بدلالة هذه المركبات .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية

القوة :

$$1 \text{ newton (N)} = 1 \text{ kg . m/s}^2$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الكتلة : كتلة الجسم هي مقياس لقصوره الذاتي ، أو مقاومة الجسم للتغيير في حالة حركته . والكتلة أحد الأبعاد الفيزيائية الأساسية وهي معرفة بالكيلو جرام المعياري الدولي .

القوة : القوة تفاعل فيزيائي متبادل إذا أثر وحده على جسم فإنه يسبب تسارعه . النيوتن الواحد هو صافي القوة الذي يعطي جسمًا كتلته 1 kg عجلة قدرها 1 m/s^2 .

قوانين نيوتن للحركة :

القانون الأول : إذا كان المجموع الاتجاهي للقوى الخارجية المؤثرة على جسم ما يساوي صفرًا فإن سرعة الجسم تظل ثابتة . يعرف هذا القانون أيضًا بمبدأ القصور الذاتي .

القانون الثاني : صافي القوة المؤثرة على جسم ينتج عجلة تتناسب مع صافي القوة وفي اتجاهه . ثابت التناسب هو مقلوب الكتلة :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}_{net}}{m} \quad \text{أو} \quad \mathbf{F}_{net} = m\mathbf{a}$$

القانون الثالث : إذا أثر جسم A بقوة $\mathbf{F}$ على الجسم B فإن B يؤثر على A بقوة مساوية ومضادة $\mathbf{-F}$.

خلاصة :

1 ـ تعرف خاصية ميل الجسم للاحتفاظ بحالة حركته بالقصور الذاتى للجسم . كلما زاد القصور الذاتى للجسم ، كلما اشتد هذا الميل . المقياس الكمى للقصور الذاتى فى وجود القوة هو كتلة الجسم .

2 ـ تعرف الكتلة بأنها بعد أساسى فى الفيزياء ، وتقاس بالكيلو جرامات فى نظام الوحدات SI . والكتلة كمية قياسية .

3 ـ يعنى القانون الثانى ضمنيًا أنه إذا كان صافى القوة المؤثرة على جسم ساكن صفرًا فإن الجسم يستمر فى حالة السكون لأن هذه حالة خاصة تناظر $v = 0$.

4 ـ تغيير حالة حركة جسم ما يتطلب صافى قوة خارجى . والجسم لا يمكنه تغيير مقدار أو اتجاه السرعة بالقوى الداخلية .

5 ـ القانون الثانى معادلة اتجاهية ويمكن تطبيقها بشكل منفصل على كل من المركبات المتعامدة للحركة .

6 ـ يمكن الآن تفسير أمثلة الحركة ذات العجلة المنتظمة فى بعد واحد (الفصل الثانى) على أنها نتيجة لتأثير صافى قوة ثابت فى اتجاه الحركة . ذلك أن $\mathbf{a}$ ثابتة ، ومن ثم فإن الجسم لا يستطيع تغيير الاتجاه .

7 ـ القوتان المتساويتان والمتضادتان فى القانون الثالث لا تؤثران على نفس الجسم ، بل إن كل قوة تؤثر على أحد الجسمين المتفاعلين .

العلاقة بين الوزن والكتلة :

الوزن (W) يتناسب مع الكتلة (ولا يساويها) . ويعتمد ثابت التناسب على مقدار قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم . هذا المقدار يمكن أن يتغير ، ويتوقف ذلك على ما إذا كان الجسم موجودًا على الأرض أو القمر أو فى الفضاء الخارجى . ثابت التناسب عند وجود الجسم على الأرض وهو عجلة السقوط الحر g . وفى الصورة الرياضية :

$$m = W/g \quad \text{أو} \quad W = mg$$

خلاصة :

1 ـ الوزن قوة أبعادها مختلفة عن الكتلة ، وتقاس القوة فى نظام الوحدات SI بالنيوتن .

2 ـ الوزن كمية متجهة ، واتجاه الوزن هو اتجاه قوة الجاذبية المؤثرة على الجسم .

3 ـ الكتلة لا تعتمد على ظروف الجاذبية حيث يوجد الجسم بعكس الوزن .

4 ـ الوزن الظاهرى لجسم **لا يساوى** mg إذا كان الجسم متحركًا بعجلة . ويكون الوزن الظاهرى لجسم ما أكبر من mg إذا كان الجسم متسارعًا فى اتجاه مضاد لقوة الجاذبية ، ويكون أصغر من mg إذا كان الجسم متسارعًا فى نفس اتجاه الجاذبية . وإذا كانت الجاذبية هى القوة الوحيدة المؤثرة على جسم ما فإن هذا الجسم يكون فى حالة سقوط حر ويكون « عديم الوزن » (أى أن وزنه الظاهرى يساوى صفرًا) .

القوة العمودية :

القوة العمودية بين سطحين متلامسين أحدهما مع الآخر هى قوة التضاغط العمودية على السطحين .

قوى الاحتكاك :

قوى الاحتكاك الاستاتيكية : هى قوى بين سطحين متلامسين ساكنين ، واتجاهها مضاد لاتجاه القوة التى تحاول بدء انزلاق أحد السطحين على الآخر . وعليه فإن قوة الاحتكاك الاستاتيكى هى قوة موازية للسطحين ويمكن أن تأخذ أى قيمة . وحتى قيمة عظمى حرجة معينة f_c ، وبعدها يبدأ انزلاق السطحين أحدهما على الآخر . ويعطى مقدار هذه القيمة العظمى بالعلاقة :

$$f_s = \mu_s F_N$$

حيث F_N هي القوة العمودية على السطحين . والكمية μ_s هي معامل الاحتكاك الاستاتيكي وتعتمد قيمتها على طبيعة السطحين ومادتيهما .

قوة الاحتكاك الحركي : هي قوة بين سطحين متلامسين ينزلق أحدهما على الآخر ، واتجاهها مضاد لاتجاه الحركة الانزلاقية . هذه القوة موازية أيضًا للسطحين ، ويعطى مقدارها بالعلاقة :

$$f_k = \mu_k F_N$$

حيث μ_k معامل الاحتكاك الحركة ، وتعتمد قيمته أيضًا على طبيعة السطحين ومادتيهما ، كما أن قيمته أصغر دائمًا من μ_s .

خلاصة :

1 ـ مقدار كل من f_s و f_k يعتمد على القوة العمودية على السطحين ، ولكن اتجاههما موازى للسطحين .

2 ـ معاملا الاحتكاك كميتان لا بعديتان ، أى لا أبعاد لهما .

3 ـ f_k لا تعتمد بدرجة ملحوظة على السرعة الانزلاقية بين السطحين .

4 ـ لا يعتمد أى من القوتين f_s و f_k بدرجة ملحوظة على مساحة التلامس بين السطحين .

الحركة على المستويات المائلة :

أى حركة على مستوى مائل مقيدة بحيث تكون فى اتجاه المنحدر ، ومن ثم فإن المجموع الجبرى لمركبات القوة فى الاتجاه العمودى على المستوى المائل يجب أن تساوى صفرًا .

المجموع الجبرى لمركبات القوة فى الاتجاه الموازى للمستوى المائل هو المسؤول عن الحركة فى الاتجاه الموازى للمستوى المائل :

$$\Sigma F_x = m\mathbf{a}$$

إذا كانت θ هى زاوية ميل المستوى المائل بالنسبة إلى الأفقى تكون مركبة الوزن الموازية للمستوى المائل إلى أسفل $mg \sin \theta$ ، وتكون مركبة الوزن العمودية عليه $mg \cos \theta$.

قوى الاحتكاك موازية دائمًا للمنحدر واتجاهها عكس اتجاه الحركة أو الميل إلى الحركة .

الكتلة عند السرعات العالية :

لا يمكن أن تتسارع الأجسام إلى سرعات تساوى سرعة الضوء c أو تزيد عنها . وعندما تقترب سرعة الجسم من c تزداد كتلته (قصوره الذاتى) مما يجعل زيادة السرعة أعلى من ذلك أكثر صعوبة . وتعتمد الكتلة على العجلة تبعًا للعلاقة :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ لماذا يميل المسافر إلى الانزلاق على مقعده عندما تنعطف السيارة بسرعة فى طريق منحنٍ ؟ لماذا تسقط كرتونة البيض من فوق المقعد عند توقف السيارة بسرعة كبيرة ؟

2 ـ ميز بين الكتلة والوزن والقصور الذاتى تمييزًا واضحًا ؟

3 ـ حدد بوضوح قوى الفعل ورد الفعل فى كل مما يأتى : طفل يركل علبة من الصفيح ، الشمس تحفظ الأرض فى مدراها كرة تكسر زجاج نافذة ، والد يصفع ابنه ، كرة ترتد من سطح منضدة ، قارب يجر متزحلقًا على الماء .

4 ـ عجلة الجاذبية على سطح القمر حوالى $1.67 \ m/s^2$. ما وزن جسم على سطح القمر إذا كانت كتلته المقاسة على سطح الأرض 2 k ؟ وما وزنه على سطح الأرض ؟ وما كتلته على سطح القمر ؟

5 ـ إذا علمت أن وزن الأجسام على سطح القمر حوالى سدس وزنها على سطح الأرض ، فهل تقدر بالتأكيد على رفع لاعب كرة قدم ثقيل إذا كان كلاهما على سطح القمر ؟ هل يمكنك إيقافه بسهولة إذا كان يجرى بسرعة معقولة على سطح القمر ؟

6 ـ هل يمكن لجسم على سطح الأرض أن يتسارع إلى أسفل بمعدل أكبر من g ؟

7 ـ افترض أن قالبًا قد أسقط من ارتفاع قدره بضعة سنتيمترات فى يدك وهى مفتوحة ومستقرة على سطح منضدة مستوية . لماذا يحتمل أن تصاب يدك فى هذا الموقف حتى إذا كانت تستطيع التقاط القالب بيدك الحرة بدون إصابة ؟

8 ـ لماذا يعتقد بوجه عام أن الشخص السكران يتعرض فى المتوسط لإصابات طفيفة عند وقوعه على الأرض بالمقارنة بالشخص غير السكران ؟ لماذا قد تكون هذه الفكرة صحيحة ؟

9 ـ لندرس أدوات المسح الكبيرة المستخدمة فى مسح ردهات وأروقة المدارس . من السهل سحب المسحة على الأرضية إذا كان ذراعها تصنع زاوية صغيرة فقط مع الأرضية . أما إذا كانت الزاوية بين الذراع والأرضية كبيرة جدًا فلن يمكن تحريك المسحة على الأرضية مهما كانت القوة المستخدمة كبيرة . اشرح ذلك . هل يمكن إيجاد علاقة بين الزاوية الحرجة للانزلاق ومعامل الاحتكاك بين الأرضية والمسحة ؟

10 ـ يوزن جسم فى مصعد . إذا بدأ المصعد فى التسارع إلى أعلى فجأة ، ماذا يحدث إذا كان الجهاز المستخدم فى عملية الوزن (أ) ميزان زنبركى ؟ (ب) ميزان تحليلى ذو كفتين ؟ (جـ) ميزان ذو ذراعين غير متساويين ؟

11 ـ صدمت سيارة متحركة سيارة أخرى ساكنة من الخلف . فى هذه الحالة تختلف الأضرار التى يتعرض لها السائقان اختلافًا واضحًا إن حدثت . اشرح ما يحدث لكل سائق .

12 ـ احسب قيمة تقديرية لأقل مسافة تتسارع خلالها سيارة من السكون إلى 10 m/s بفرض أن موتور السيارة قوى جدًا .

13 ـ من أين تأتى القوة التى تسبب تسارع لاعب القفز العالى إلى أعلى فى اللحظة التى يترك فيها الأرض ؟ قدر قيمة القوة التى يقع اللاعب تحت تأثيرها فى قفزة ارتفاعها 2 m .

14 ـ قدر القوة التى يجب أن يؤثر بها كاحلاك على الأرض بعد قفزة ارتفاعها 2.0 m . لماذا يجب عليك أن تثنى رجليك فى مثل هذا الموقف ؟

مسائل

القسم 4-3

1 ـ ما مقدار القوة التى يجب أن تؤثر على طلقة رصاص كتلتها 8.5 g لإكسابها عجلة قدرها $18,000 \ m/s^2$ ؟ وبفرض أن هذه العجلة ثابتة ، ما مقدار سرعة الطلقة بعد أن تكون قد قطعت مسافة قدرها 2.35 cm من السكون ؟

2 ـ تؤثر قوة غير متزنة مقدارها 4600 N على سيارة كتلتها 1650 kg فتسبب تسارعها من السكون فى طريق سريع أفقى . (أ) ما قيمة عجلة السيارة ؟ (ب) ما الزمن اللازم للسيارة للوصول إلى سرعة مقدارها 21.2 m/s ؟

3 ـ سيارة كتلتها 1350 kg يمكنها التسارع من السكون 23.4 m/s خلال 7.7 s . (أ) ما قيمة العجلة ؟ (ب) ما مقدار القوة اللازمة للحصول على هذه العجلة ؟

4 ـ القوة الأفقية اللازمة لكى تسبب انزلاق صندوق على أرضية أفقية بسرعة ثابتة مقدارها 0.485 m/s تساوى 26.7 N . ما مقدار قوة الاحتكاك المعاكسة للحركة ؟

5 ـ إذا شد حبل سحب بزاوية قدرها °27 بالنسبة إلى الأفقي بقوة قدرها 365 N فإنه يسبب انزلاق صندوق كتلته 55.2 kg على أرضية أفقية بسرعة ثابتة المقدار قدرها 20.5 cm/s . ما مقدار قوة الاحتكاك المعاكسة لحركة الصندوق ؟

6 ـ قارب متحركة بسرعة ثابتة المقدار قدرها 13.5 vm/s يشد متزحلقًا على الماء ، وكان الشد في الحبل 165 N . ما مقدار القوة المعاكسة للحركة التي يؤثر بها الماء والهواء على المتزحلق ؟

7 ـ يهبط أحد المظليين (القافزين بالباراشوت) وكتلته 72 kg إلى الأرض بسرعة ثابتة مقدارها 9. m/s ، وكانت كتلة الباراشوت 6.6 kg . (أ) ما وزن المظلي ؟ (ب) ما مقدار القوة الرأسية إلى أعلى والتي يؤثر بها الهواء على المظلي والمظلة ؟

8 ـ لكي تكتسب سيارة كتلتها 1720 kg عجلة قدرها $0.175\ m/s^2$ في طريق مستو يجب أن تؤثر عليها قوة أفقية قدرها 4770 N . ما مقدار القوة المعوقة للحركة ؟

■ 9 ـ يدعي أحد الإعلانات أن سيارة معينة كتلتها 1060 kg يمكنها التسارع من السكون إلى 80 km/h خلال زمن قدره 9.4 s . ما مقدار صافي القوة الذي يجب أن يؤثر على السيارة لإكسابها هذه العجلة ؟

10 ـ سيارة تسحب سيارة أخرى كتلتها 1730 kg . فإذا أريد أن تتسارع السيارة المسحوبة تسارعًا منتظمًا من السكون إلى 2.3 m/s خلال 10.3 s ، فما مقدار القوة التي يجب أن يؤثر بها حبل السحب على تلك السيارة ؟

11 ـ توقفت سيارة متحركة بمعدل 17.5 m/s وكتلتها 1570 kg خلال مسافة قدرها 94.5 m . ما مقدار القوة اللازمة لإيقاف السيارة ؟ افترض أن التقاصر ثابت .

القسم 5-3

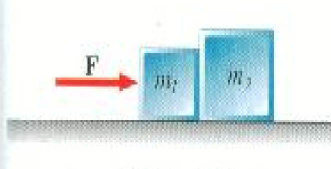
12 ـ تسقط كرة وزنها 5 N تجاه الأرض . (أ) ما مقدار صافي القوة المؤثر على الكرة أثناء السقوط ؟ (ب) ما هي القوة (مقدارًا واتجاهًا) التي تؤثر بها الكرة على الأرض نتيجة لهذا السقوط ؟

13 ـ افترض أن الكرة المذكورة في المسألة 12 مستقرة على منضدة . (أ) ما مقدار صافي القوة المؤثر على الكرة ؟ (ب) ما هي القوى (بما في ذلك الاتجاه) التي تؤثر بها الكرة على المنضدة وعلى الأرض ؟

14 ـ اصطدمت شاحنة بسيارة صغيرة فأثرت عليها بقوة قدرها 26,000 N . ما مقدار القوة التي تؤثر بها السيارة على الشاحنة ؟ لماذا تعاني السيارة أضرارًا أشد من الشاحنة ؟

■ 15 ـ بندقية مثبتة تثبيتًا شديدًا على نضد ثقيل ، وكانت ماسورتها وطولها 75 cm ممددة في اتجاه أفقي . أطلقت طلقة كتلتها 9.0 g من هذه البندقية فتركت الفوهة بسرعة مقدارها 970 m/s . بفرض أن عجلة الطلقة داخل ماسورة البندقية ثابتة ، ما قيمة القوة الأفقية التي تؤثر بها البندقية على النضد في لحظة الإطلاق ؟

■ 16 قالبان كتلة الأول $m_1 = 3.2\ kg$ وكتلة الثاني $m_2 = 4.1\ kg$ متلامسان أحدهما مع الآخر على منضدة لا احتكاكية كما هو مبين بالشكل م1-3 . إذا كانت القوة الموضحة والمؤثرة على m_1 تساوى 6.8 N ، (أ) ما قيمة عجلة القالبين ؟ (ب) بأي قوة يدفع القالب m_1 القالب الآخر m_2 ؟ (جـ) كرر الجزئين أ و ب إذا كانت **F** تؤثر في الاتجاه المعاكس بحيث تدفع m_2 بدلًا من m_1 .



شكل م1-3

القسم 6-3

17 ـ ما وزن كل من الأجسام الآتية (بالنيوتن والباوند) : (أ) كرة كتلتها 1.0 kg ؟ (ب) شخص كتلته 60 kg ؟ (جـ) سيارة كتلتها 1350 kg ؟ (د) موظ (حيوان ضخم) كتلته 1 ton ؟ (هـ) 454 g من الزبد ؟

18 ـ ما كتلة كل من الأجسام الآتية بالكيلو جرام : (أ) 1.2 lb من الدقيق ؟ (ب) مصباح وزنه 15 N ؟ (جـ) شخص وزنه 160 lb ؟ (د) كتلة خشبية وزنها 1750 N ؟ (هـ) 1 طن مترى من الفحم ؟

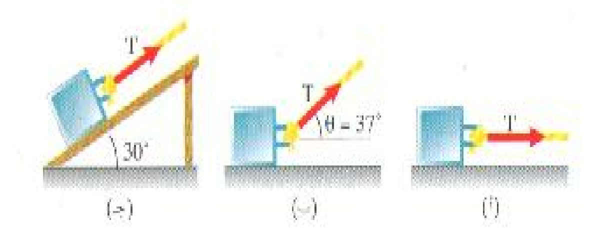
19 ـ حبل يشد حقيبة جلدية وزنها 54 N رأسيًا إلى أعلى ، وكانت الحقيبة متحركة إلى أعلى بعجلة قدرها $a = 0.77\ m/s^2$. ما قيمة الشد في الحبل ؟

20 ـ يستخدم حبل لإنزال جوال من البطاطس كتلته 20.5 kg ، وكانت عجلة الجوال $a = 0.155\ m/s^2$ رأسيًا إلى أسفل . ما قيمة الشد في الحبل ؟

■ 21 ـ لوحظ أن الأجسام الساقطة سقوطا حرًا بالقرب من سطح القمر تتسارع رأسيًا إلى أسفل بعجلة قدرها $a = 1.63\ m/s^2$ ، وهناك رائد فضاء وزنه بالبذلة الفضائية 960 N على الأرض . (أ) ما وزن رائد الفضاء على سطح القمر ؟ (ب) ما كتلته على القمر ؟ (جـ) ما كتلته على الأرض ؟

القسم 3-7

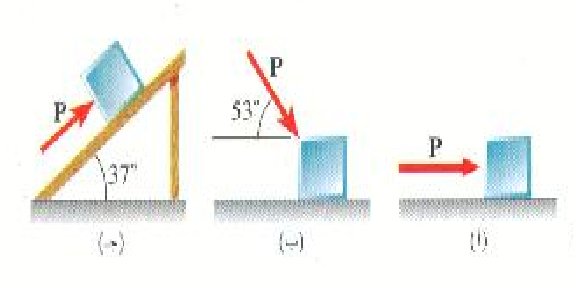
22 ـ وزن كل قالب بالشكل م2-3 يساوى 70 N والقوة $T = 35\ N$. أوجد القوة العمودية في كل حالة .



شكل م2-3

23 ـ وزن كل قالب في الشكل م3-3 يساوى 47 N والقوة $P = 28\ N$. أوجد القوة العمودية في كل حالة .

■ 24 ـ افترض في الشكل م3-3 أن وزن القالب 66 N ، $P = 42\ N$ وأن معامل الاحتكاك يساوى 0.22 . (أ) ما هي قوة الاحتكاك في كل حالة ؟ (ب) ما قيمة عجلة كل قالب ؟



شكل م3-3

■ 25 ـ إذا كان وزن القالب في الشكل م2-3 يساوى 54 N ، $T = 39\ N$ ومعامل الاحتكاك يساوى 0.42 . (أ) ما هي قوة الاحتكاك في كل حالة ؟ (ب) ما قيمة عجلة كل قالب ؟

26 ـ ينزلق صندوق كتلته 5.5 kg إلى أسفل على مستوى مائل بزاوية قدرها 27° تحت تأثير الجاذبية . إذا كان القالب ينزلق بسرعة ثابتة المقدار ، ما قيمة قوة الاحتكاك المعوقة لحركة الصندوق ؟

27 ـ وضع قالب كتلته 27 g على مستوى مائل يمكن تغيير زاوية ميله . زيدت زاوية المستوى المائل ببطء فبدأ القالب في الانزلاق عندما أصبحت الزاوية 38.5° . ما قيمة معامل الاحتكاك بين القالب والمستوى المائل ؟ هل تمثل هذه القيمة معامل الاحتكاك الاستاتيكي أم الحركي ؟

■ 28 ـ معامل الاحتكاك الاستاتيكي في الشكل م3-3ب يساوى 0.5 . ما قيمة P عندما يبدأ القالب في الانزلاق إذا كان وزنه 165 N ؟

■ 29 ـ إذا كان معامل الاحتكاك بين إطارات سيارة وطريق سريع 0.62 ، فما أقل مسافة يمكن أن تتسارع خلالها السيارة من السكون إلى 20.7 m/s ؟

■ 30 ـ كان طفل يجرى على أرضية زلقة بمعدل 3.55 m/s عندما قرر الانزلاق . فإذا كان معامل الاحتكاك بين حذاءه والأرضية 0.15 ، ما المسافة التى ينزلقها هذا الطفل قبل التوقف ؟

■ 31 ـ ما أقصر مسافة يمكن أن تتوقف خلالها سيارة متحركة بسرعة قدرها 34.2 m/s على طريق مستوٍ إذا كانت القيمة العظمى لمعامل الاحتكاك (معامل الاحتكاك الاستاتيكى) بين إطارات السيارة وسطح الطريق 0.83 ؟

القسم 8-3

32 ـ يتسارع إلكترون $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg فى أنبوبة تليفزيون من السكون إلى 6.25×10^{7} m/s خلال 0.88 cm . أوجد متوسط القوة المعجلة للإلكترون . كم ضعفًا تمثل هذه القوة بالنسبة إلى mg ؟

33 ـ اصطدمت سيارة كتلتها 1130 kg تتحرك بسرعة مقدارها 17.6 m/s بشجرة فتوقفت خلال مسافة قدرها 0.77 m . ما قيمة القوة المتوسطة التى تؤثر بها الشجرة على السيارة ؟

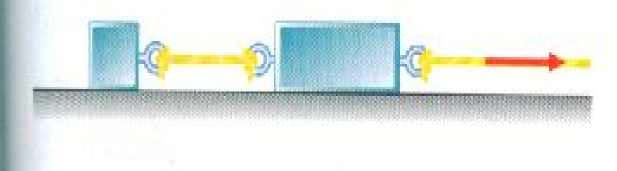
■ 34 ـ دخلت طلقة رصاص كتلتها 9.1 g قطعة من البلاستيك سمكها 2.3 cm بسرعة مقدارها 165 m/s ثم خرجت من الجانب الآخر بسرعة مقدارها 92 m/s . ما قيمة القوة المتوسطة التى تؤثر بها الرصاصة على قطعة البلاستيك ؟

■ 35 ـ إذا شددت كتلة قدرها 3.2 kg رأسيًا إلى أعلى باستخدام حبل يستطيع بالكاد حمل كتلة مقدارها 15 kg فى حالة السكون ، فما أكبر عجلة رأسية إلى أعلى يمكنك أن تكسبها للكتلة 3.2 kg ؟

■ 36 ـ بدأت سيارة فى التسارع أفقيًا من السكون وكان على سطحها كتاب . إذا كان معامل الاحتكاك بين السيارة والكتاب 0.36 ، فما أكبر عجلة يمكن أن تتحرك بها السيارة بحيث لا ينزلق الكتاب على سطحها ؟

■ 37 ـ تستقر كرتونة بيض على مقعد سيارة متحركة بمعدل 22.5 m/s . ما هى أقل مسافة يمكن أن تتباطأ السيارة خلالها بانتظام إلى أن تتوقف تمامًا بحيث لا تنزلق كرتونة البيض ؟ قيمة μ بين الكرتون والمقعد تساوى 0.24 .

■ 38 ـ قالب أسمنتى موضوع فى صندوق شاحنة تهبط على مستوى مائل زاويته 23.5° ، وكانت السيارة متباطئة بمعدل 1.15 m/s² أثناء الهبوط . ما قيمة معامل الاحتكاك الاستاتيكى بين الأرضية والقالب حتى لا ينزلق القالب ؟



شكل م4-3

■■ 39 ـ الشد فى الحبل الذى يجذب القالبين فى الشكل م4-3 يساوى 58 N . أوجد عجلة القالبين والشد فى حبل التوصيل إذا كانت قوة الاحتكاك المؤثرة على القالبين مهملة . كرر المسألة عندما يكون معامل الاحتكاك بين القالبين والسطح 0.33 .

■ 40 ـ ما قيمة T التى يمكنها إكساب القالبين عجلة قدرها 0.62 m/s² فى الشكل م4-3 ، (أ) إذا كانت قوى الاحتكاك مهملة ؟ ، إذا كان معامل الاحتكاك بين القالبين والسطح 0.43 ؟ أوجد أيضًا الشد فى حبل التوصيل فى كل حالة .

■ 41 ـ كتلة القالب 1 فى الشكل م5-3 تساوى 3.25 kg وكتلة القالب 2 تساوى 1.92 kg .

(أ) ما قيمة عجلة القالبين والشد فى حبل التوصيل بفرض أن الاحتكاك مهمل ؟

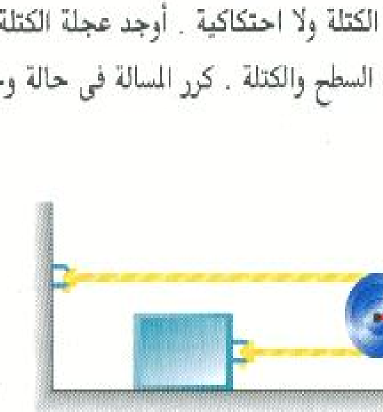
(ب) كرر المسألة عندما تؤثر قوة معوقة 10.2 N على القالب 1 .

شكل م5-3

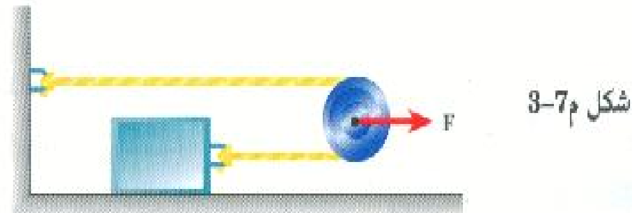
■ 42 ـ فى الشكل م3-5 كتلة الجسم 1 تساوى 2650 g وكتلة الجسم 2 تساوى 1650 g . عند تحريك المجموعة سقط الجسم 2 مسافة قدرها 65 cm خلال 1.44 s . ما مقدار قوة الاحتكاك المعوقة لحركة الجسم 1 ؟ افترض عدم وجود قوى احتكاك فى باقى النظام .

■ 43 ـ أوجد الشد فى الحبل فى الشكل م3-6 وكذلك الزمن اللازم لكى تتحرك الكتلتان 220 cm ابتداء من السكون . افترض أن البكرة لا احتكاكية وعديمة الكتلة .

■ 44 ـ البكرة فى الشكل م3-7 عديمة الكتلة ولا احتكاكية . أوجد عجلة الكتلة بدلالة F فى حالة عدم وجود احتكاك بين السطح والكتلة . كرر المسألة فى حالة وجود قوة احتكاك f .

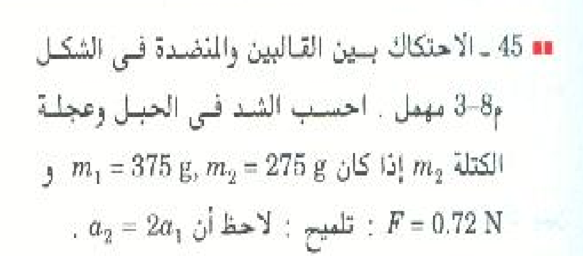


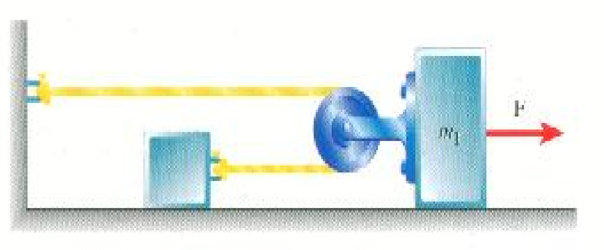
شكل م3-6



شكل م3-7

■■ 45 ـ الاحتكاك بين القالبين والمنضدة فى الشكل م3-8 مهمل . احسب الشد فى الحبل وعجلة الكتلة m_2 إذا كان $m_1 = 375\ g, m_2 = 275\ g$ و $F = 0.72\ N$: تلميح : لاحظ أن $a_2 = 2a_1$.



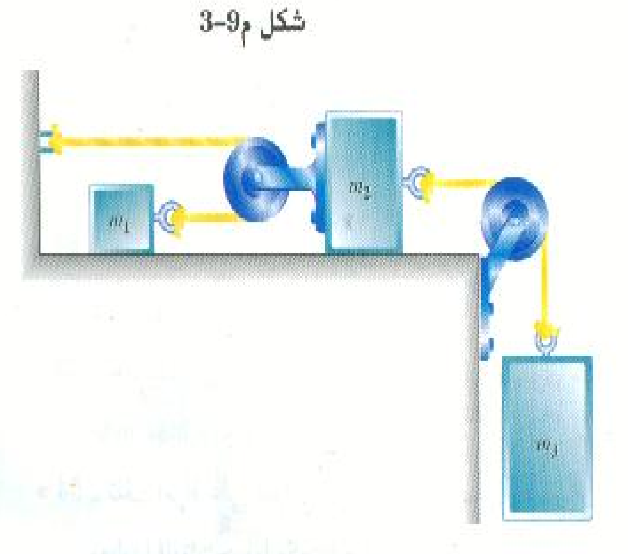


شكل م3-8

■■ 46 ـ افترض فى الشكل م3-9 أن قيمة معامل الاحتكاك عند السطح العلوى والسفلى للقالب ذى الكتلة 700 g واحدة . إذا كانت $a = 135\ cm/s^2$ عندما كانت $F = 1.90\ N$ ، ما قيمة معامل الاحتكاك ؟

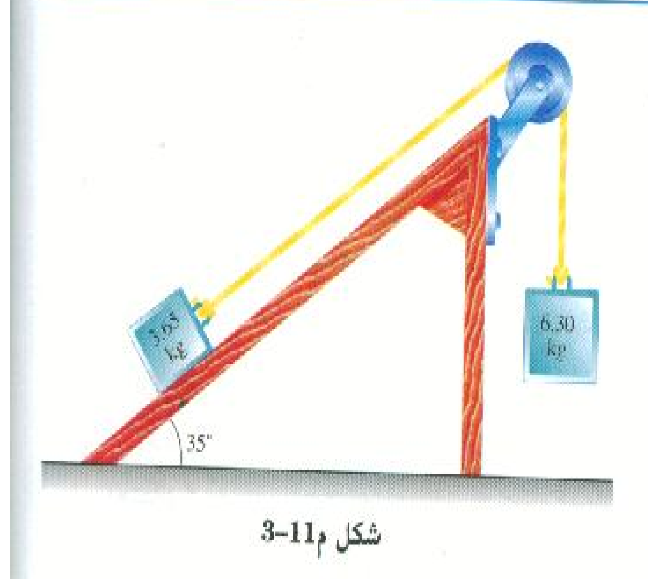
شكل م3-9

■■ 47 ـ أوجد الشد فى الحبلين وعجلة كل قالب فى الشكل م3-10 إذا كان الاحتكاك مهملاً . اعتبر أن البكرتين لا احتكاكيتين وعديمتى الكتلة ، وأن $m_1 = 215\ g$ ، $m_2 = 500\ g$ و $m_3 = 365\ g$.



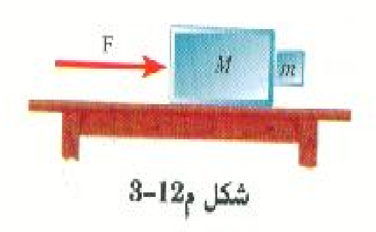
شكل م3-10

■ 48 ـ أوجد عجلة القالبين فى الشكل م11–3 والشد فى الحبل (أ) إذا كان الاحتكاك مهملاً ،(ب) إذا كان $\mu = 0.25$. أوجد التعبير العام للعجلة a بدلالة m_1 الموجودة على المنحدر ، m_2 ، g ، μ .



شكل م11–3

■■ 49 ـ القوة **F** فى الشكل م12–3 تدفع قالبًا كتلته M ، وهذا يدفع بدوره قالبًا كتلته m ، وليس هناك احتكاك بين M والسطح الحامل . إذا كان معامل الاحتكاك بين القالبين μ ، ماذا يجب أن تكون قيمة F حتى لا تنزلق الكتلة m ؟



شكل م12–3

القسمان 9–3 و 10–3

■ 50 ـ القوة المعوقة لحركة صندوق كتلته 85 kg على أرضية مستوية تساوى 365 N (أ) ما قيمة معامل الاحتكاك بين الصندوق والأرضية ؟ (ب) بفرض أن معامل الاحتكاك لا يتغير مع زيادة السرعة ، ما قيمة العجلة التى يمكن إعطاؤها للصندوق بشدة بقوة مقدارها 660 N اتجاهها مائل بزاوية قدرها 48° فوق الأفقى ؟

■ 51 ـ أوجد عجلة القالب ذى الكتلة 2.85 kg فى الشكل م13–3 إذا كان معامل الاحتكاك بين القالب والسطح 0.77 . (ب) كرر المسألة إذا كانت القوة 50 N تدفع القالب **إلى أسفل** بزاوية قدرها 22.5° تحت الأفقى (أى إذا عكس اتجاه القوة فى الشكل) .

شكل م13–3

■ 52 ـ ما مقدار القوة الموازية لمستوى مائل زاويته 37° التى تلزم لإعطاء صندوق كتلته 3.25 kg عجلة قدرها 1.85 m/s² فى اتجاه مواز للمستوى المائل إلى أعلى . (أ) إذا كان الاحتكاك مهملاً ؟ ، (ب) إذا كان معامل الاحتكاك 0.45 ؟

■ 53 ـ حرر صندوق كتلته 10.6 kg موضوع على مستوى مائل زاويته 22° فتسارع إلى أسفل على المستوى المائل بمعدل قدره 0.37 m/s² . أوجد قوة الاحتكاك المعوقة لحركته . ما قيمة معامل الاحتكاك ؟

■ 54 ـ تقف امرأة على ميزان زنبركى داخل مصعد . (الميزان يقرأ القوة التى يدفعها بها الميزان إلى أعلى) . ما القراءة التى يعطيها الميزان حينما يكون المصعد متسارعًا (أ) إلى أعلى بمعدل 3.65 m/s² ؟ (ب) إلى أسفل بمعدل 2.70 m/s² ؟

▪ 55 ـ كتلة مقدارها 220 g معلقة فى خيط ويتدلى من أسفلها خيط آخر يحمل كتلة مقدارها 275 g . أوجد الشد فى الخيطين إذا كانت الكتلتان (أ) ساكنتين ، (ب) متسارعتين إلى أعلى بمعدل $16.5\ m/s^2$ ، (جـ) متحركتين إلى أسفل بعجلة ثابتة مقدارها $7.8\ m/s^2$ ، (د) ساقطتين سقوطًا حرًا تحت تأثير الجاذبية ، (هـ) متحركتين إلى أسفل بسرعة ثابتة مقدارها 10 m/s .

▪ 56 ـ يبدأ قالب كتلته 0.95 kg الانزلاق من السكون إلى أسفل على مستوى مائل زاويته 32° . ما المسافة التى ينزلقها القالب فى أول 2.7 s . (أ) إذا كان الاحتكاك مهملاً ، (ب) إذا كان $\mu = 0.50$ بين القالب والسطح ؟

▪ 57 ـ تقف سيارة كتلتها 1250 kg ساكنة على تل يميل بزاوية قدرها 8.5° بالنسبة إلى الأفقى . ما المسافة التى تقطعها السيارة فى أول 8.0 s بعد تحرير الفرامل ؟ (أ) إذا كانت السيارة تتدحرج حرة إلى أسفل التل ؟ (ب) إذا وجدت قوة احتكاك معوقة للحركة مقدارها 1600 N ؟

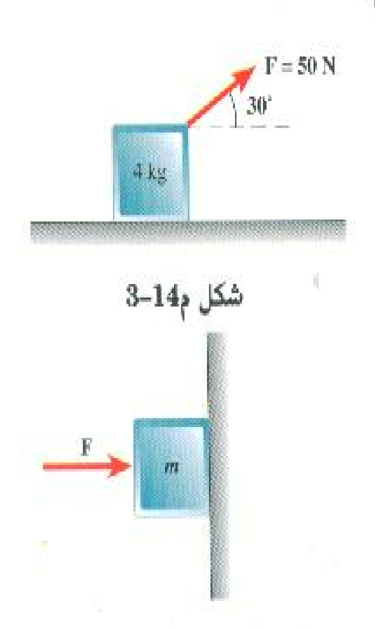
مسائل عامة

▪▪ 58 ـ عربتان صغيرتان كتلتاهما M_1 و M_2 تقفان ساكنتين على طريق أفقى مستقيم ، وكانت المسافة بينهما D كما كان هناك حبل ممتد بين العربتين . قام ركاب العربة 1 بشد الحبل بأسلوب يجعل الشد فيه ثابتا فتحركت العربتان تجاه إحداهما الأخرى . (أ) فى أى موضع بالنسبة لموضع العربة 2 تتصادم العربتان ؟ ما النسبة بين مقدارى السرعتين قبل التصادم مباشرة ؟

▪▪ 59 ـ أثبت أن عجلة سيارة متحركة على طريق أفقى لا يمكن أن تزيد عن μg ، حيث μ معامل الاحتكاك بين الإطارات والطريق . ما التعبير المناظر لعجلة سيارة تصعد مستوى مائلاً زاويته θ ؟ لماذا يعتبر من الإسراف غير المنتج أن نجعل السيارة « تحرق مطاطها » فى « الطلعات الأمريكانى » ؟ هل يختلف الأمر إذا كانت السيارة ذات دفع ثنائى أو دفع رباعى ؟

▪▪ 60 ـ علقت مسافرة فى سفينة كبيرة مبحرة فى بحر هادى كرة فى سقف قمرتها باستخدام خيط طويل . لاحظت هذه المسافرة أن كرة البندول تتأخر عند نقطة التعليق وأن البندول لا يكون رأسيا كلما تسارعت السفينة . ماذا يكون مقدار عجلة السفينة عندما يتخذ البندول وضعًا يميل بزاوية قدرها 6.5° بالنسبة للرأسى .

▪▪ 61 ـ الشكل م14-3 يمثل صندوقًا كتلته 4 kg على سطح أفقى وكان معاملا الاحتكاك الاستاتيكى والحركة للسطحين المتلامسين 0.8 و 0.6 على الترتيب . شددت الصندوق بقوة قدرها 50 N فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 30° فوق الأفقى . (أ) ما قيمة القوة العمودية المؤثرة على الصندوق ؟ (ب) ما قيمة عجلة الصندوق ؟ (جـ) أجب عن السؤالين أ ، ب بفرض أنك قد عكست قوتك بحيث تدفع الصندوق بزاوية قدرها 30° تحت الأفقى : (**تلميح** : لا تفترض أن الصندوق متحرك عندما تدفعه) .

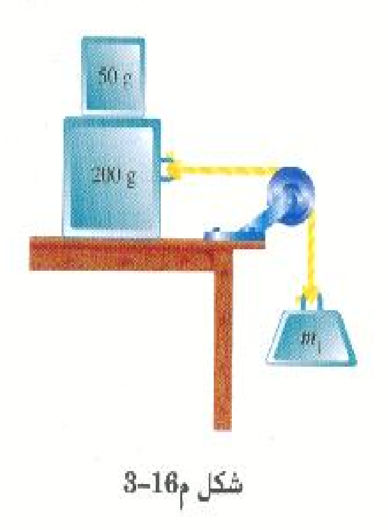


شكل م14-3

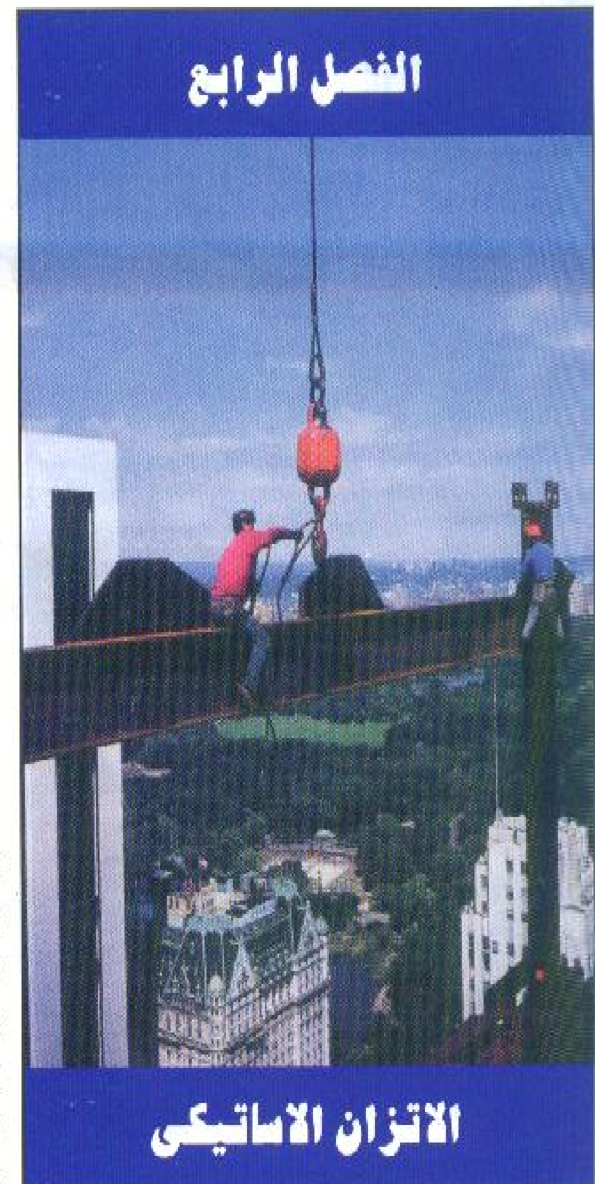
شكل م15-3

▪ 62 ـ يمثل الشكل م15-3 قوة أفقية تؤثر على قالب خشبى ملامس لحائط خشبى رأسى . افترض أن هذه القوة كبيرة بدرجة كافية لمنع الصندوق من السقوط . إذا كان معامل الاحتكاك الاستاتيكى بين الحائط والقالب 0.65 ، فما هو أقل مقدار لقوة الدفع المؤثرة على الصندوق ؟

63 ـ الكتلة 50 g في الشكل م16-3 مستقرة على السطح العلوى للكتلة 200 g ، ومعامل الاحتكاك الاستاتيكى بين هاتين الكتلتين 0.3 . كذلك فإن الكتلة 200 g يمكنها التحرك بحرية على منضدة أفقية لا احتكاكية ، وهناك خيط يربط بين الكتلة 200 g وكتلة أخرى m_1 عن طريق بكرة لااحتكاكية عديمة الوزن . ما أكبر قيمة للكتلة m_1 بحيث تظل الكتلة 50 g باقية على السطح العلوى للكتلة 200 g أثناء تسارع المجموعة ؟



شكل م16-3



يختص جزء هام من علم الفيزياء بالأجسام والأنظمة الساكنة ، ويسمى هذا الفرع من الفيزياء **بالاستاتيكا** ، وهو ذو أهمية مركزية لمن يقومون بتصميم وتشييد الكبارى والأبنية وغير ذلك من الإنشاءات التى نعتمد على استقرارها . كذلك فإن الاستاتيكا تمثل أهمية كبيرة لنا من حيث أنها مجال رحب لتطبيق قوانين الميكانيكا التى درسناها فى الفصل السابق . وسوف نكتشف أثناء دراسة هذا الفصل ضرورة تحقق شرطيين أساسيين إذا أريد لجسم أن يستمر فى حالة السكون ، كما سنتعرض لكيفية تطبيق هذين الشرطيين ونتعرف على النتائج المترتبة عليهما .

4-1 الشرط الأول للاتزان

عندما يكون الجسم ساكنًا ومستمرًا فى حالة السكون فإننا نقول أنه فى **حالة اتزان استاتيكى** . وهناك شرطان **اثنان** للاتزان . الشرط الأول يمكن اشتقاقه من قانون نيوتن الثانى لأن سكون الجسم يمثل حالة خاصة لثبات السرعة ، وهى هنا تساوى صفرًا . وعليه فإن الجسم المستمر فى حالة السكون لا تقع تحت تأثير أى عجلة ، وطبقًا لقانونى نيوتن الأول والثانى يجب أن يكون صافى القوة المؤثرة عليه صفرًا . هذا هو الشرط الأول للاتزان .

لكى يوجد الجسم فى حالة اتزان يجب أن يكون المجموع الاتجاهى للقوى المؤثرة صفرًا .

والنص على أن المجموع الاتجاهى للقوى المؤثرة على جسم يساوى صفرًا يكافئ قولنا أن

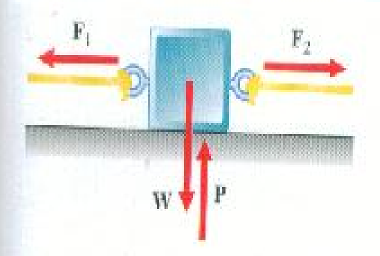
جميع المركبات المتعامدة للعجلة فى قانون نيوتن الثانى (المعادلات 1-3ب) تساوى صفرًا .

$$\Sigma F_x = 0 \qquad \Sigma F_y = 0 \qquad \Sigma F_z = 0 \qquad (4-1)$$

ويوضح الشكل 4-1 مثالاً للاتزان فى بعدين . لكى يظل الصندوق ساكنًا فى وجود القوى الأربع المؤثرة عليه يجب أن يكون مجموع كل من المركبات الأفقية والرأسية للقوى صفرًا . وبتطبيق المعادلات (4-1) على هذه الحالة نحصل على :

$$F_1 - F_2 = 0 \qquad \text{و} \qquad P - W = 0$$

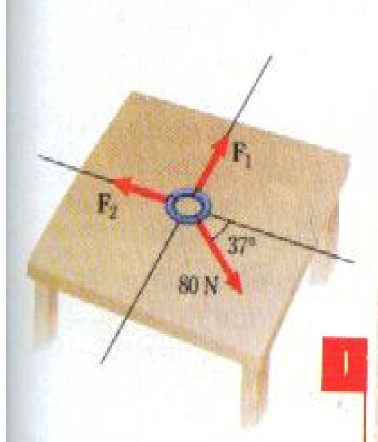
علمًا بأننا قد أخذنا الاتجاه فى الاعتبار باستخدام الإشارة المناسبة (الاتجاه إلى اليمين وإلى أعلى موجب ، والاتجاه إلى اليسار وإلى أسفل سالب) . وعليه فإن الرموز P ، W ، F_2 ، F_2 تمثل مقادير القوى .



شكل 4-1 :
لكى يبقى القالب ساكنًا يجب أن تتعادل القوى فى كلا الاتجاهين الأفقى والرأسى .

مثال 4-1 :

الحلقة فى الشكل 4-2 ساكنة على منضدة تحت تأثير الشد بواسطة ثلاثة خيوط ، وكان الشد فى أحدها 80 N . أوجد الشد فى الخيطين الآخرين . (تذكر من الفصل الثالث أن الشد قوة اتجاهها على استقامة الخيط أو الحبل ويكون دائمًا مبتعدًا عن الجسم المتصل به) .



استدلال منطقى :

سؤال : بما أن هذه القوى الثلاث كلها أفقية ، كيف تلعب الجاذبية دورًا فى تحديد الشد ؟

الإجابة : شد الجاذبية إلى أسفل يجب أن يتعامل مع دفع المنضدة إلى أعلى لكى تبقى الحلقة على المنضدة . ونظرًا لأن هاتين القوتين ليس لهما مركبات أفقية فإنهما لا يمكن أن تؤثر على الشد فى الخيوط الأفقية .

سؤال : ما المبدأ اللازم تطبيقه لتعيين الشدين F_1 ، F_2 ؟

الإجابة : الشرط الأول للاتزان : مجموع المركبات x والمركبات y لجميع القوى لابد أن يكون صفرًا .

سؤال : F_1 لها مركبة فى الاتجاه y فقط وكذلك F_2 لها مركبة فى الاتجاه x فقط . ما هما مركبتا المتجه 80 N ؟

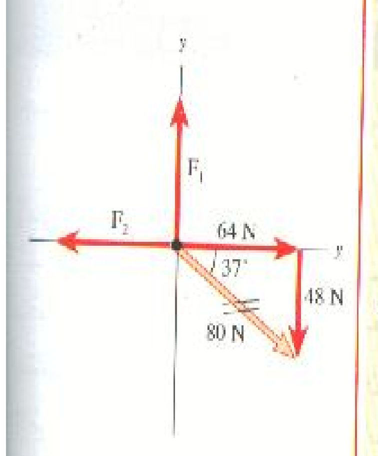
الإجابة : المركبتان ، كما هو مبين بالشكل 4-2ب ، هما 64 N+ فى الاتجاه x ، 48 N- فى الاتجاه y .

سؤال : ما المعادلات التى يعطيها شرط الاتزان ؟

الإجابة :

$$\Sigma F_x = 0 \ : \ 64\ \text{N} + F_2 = 0$$

$$\Sigma F_y = 0 \ : \ F_1 + (-48\ \text{N}) = 0$$

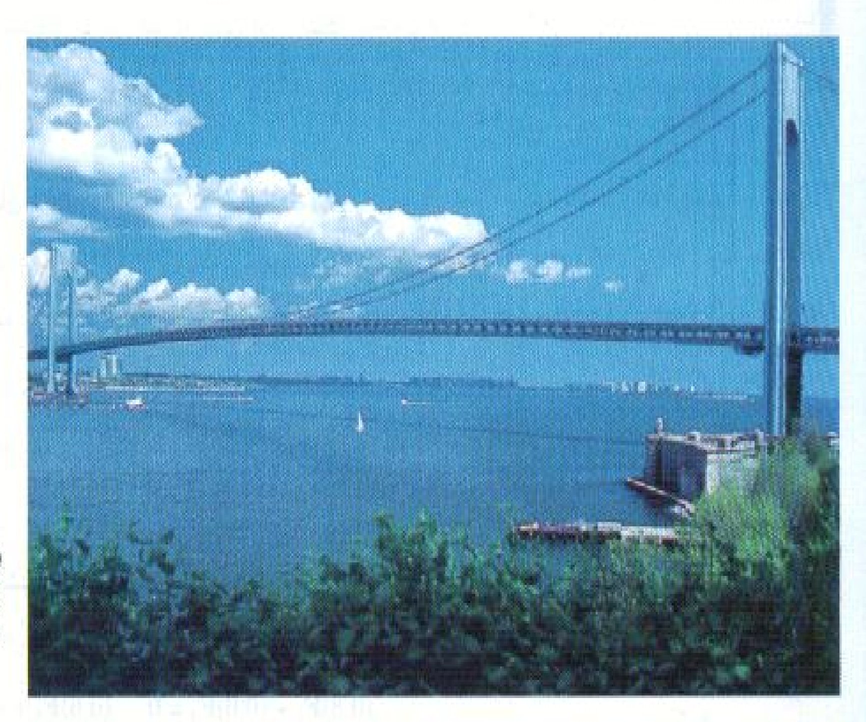


شكل 4-2 :
أوجد F_1 ، F_2 إذا كانت الحلقة فى حالة اتزان

الحل :

$$F_1 = +48\ N \qquad F_2 = -64\ N$$

تمرين : استبدل القوة 80 N فى الشكل 2-4 أ بقوة مجهولة F_3 . أوجد F_2 و F_3 إذا كانت $F_1 = 42\ N$. **الإجابة :** $F_3 = 70\ N$ ، $F_2 = 56\ N$



يعتمد الكوبرى المعلق على أن جميع القوى المؤثرة عليه فى حالة اتزان استاتيكى .

4-2 حل المسائل فى الاستاتيكا

بقليل من التدريب يمكن استخدام المعادلة 1-4 فى حل كثير من مسائل علم الاستاتيكا ، ولكن من الضرورى اتباع بعض القواعد البسيطة حتى لا تختلط الأمور عليك :

1 ـ اعزل الجسم الذى سوف تتحدث عنه . القوى المؤثرة على هذا الجسم هى فقط تلك القوى التى تحتاجها لكتابة المعادلة (1-4) .

2 ـ ارسم القوى المؤثرة على الجسم الذى عزلته وميزها بعلامات فى المخطط البيانى للجسم الحر . (استخدم حروفاً مثل F ، P ، Q كرموز لأى قوى مجهولة القيمة) .

3 ـ حلل كل قوة إلى مركباتها فى الاتجاهات z ، y ، F وميز هذه المركبات بدلالة الرموز المعطاة فى القاعدة 2 مع جيوب وجيوب تمام الزاوية المناسبة .

4 ـ اكتب المعادلة 1-4 .

5 ـ حل المعادلات بالنسبة للمجاهيل .

مثال 2-4 :

الجسم الموضح فى الشكل 3-4 أ يزن 400 N وهو معلق فى حالة سكون . أوجد الشد فى كل من الحبلين .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن تحديد القوى المؤثرة على الجسم ؟

الإجابة : وزن الجسم ويؤثر في الاتجاه الرأسى إلى أسفل ومقداره 400 N . وطبقاً لتعريف الشد يجب أن يكون اتجاها القوتين الأخريين على استقامة الحبلين بحيث تكونا مبتعدتين عن الجسم . لنرمز لهاتين القوتين بالحرفين F_1 و F_2 . وبرسم المخطط البيانى للجسم الحر باستخدام هذه الرموز سنجد أن المخطط البيانى كما هو مبين فى الشكل 3-4ب أن :

سؤال : ما مبدأ تعيين الشدين F_1 و F_2 ؟

الإجابة : الشرط الأول للاتزان .

سؤال : حيث أن F_1 و F_2 مجهولتان ، كيف يمكن كتابة مركباتهما ؟

الإجابة : تذكر أن قيم جيب وجيب تمام الزاوية تمثل كسور القوتين F_1 و F_2 المؤثرتين فى الاتجاهين x و y ، على الترتيب ، إذن :

$(\mathbf{F}_1)_x = \mathbf{F}_1 \cos 37° = (0.80)\mathbf{F}_1 \qquad (\mathbf{F}_1)_y = \mathbf{F}_1 \sin 37° = (0.60)\mathbf{F}_1$

$(\mathbf{F}_2)_x = \mathbf{F}_2 \cos 53° = (0.60)\mathbf{F}_2 \qquad (\mathbf{F}_2)_y = \mathbf{F}_2 \sin 37° = (0.80)\mathbf{F}_2$

هذه المركبات مبنية بالشكل 3-4جـ .

سؤال : ما المعادلات التى يعطيها الشرط الأول ؟

الإجابة : الشرطان $\Sigma \mathbf{F}_x = 0$ و $\Sigma \mathbf{F}_y = 0$ فى الصورة الاتجاهية يكونان كالتالى :

$$(0.8)\mathbf{F}_1 + (0.6)\mathbf{F}_2 = 0 \qquad (0.6)\mathbf{F}_1 + (0.8)\mathbf{F}_2 - 400\ \mathrm{N} = 0$$

ولكتابة هذين الشرطين فى الصورة غير الاتجاهية يجب ملاحظة اتجاهات المركبات فى الشكل 3-4جـ واستخدام المقادير بالإشارات الصحيحة :

(أ) $$-(0.8)F_1 + (0.6)F_2 = 0$$

(ب) $$(0.6)F_1 + (0.8)F_2 - 400\ \mathrm{N} = 0$$

لاحظ أن لدينا معادلتان فى مجهولين .

الحل :

الطريقة (1) : حذف أحد المتغيرين بالجمع أو الطرح . بضرب المعادلة (أ) فى 0.6 والمعادلة (ب) فى 0.8 نجد أن :

(جـ) $$0.36F_2 - 0.48F_1 = 0$$

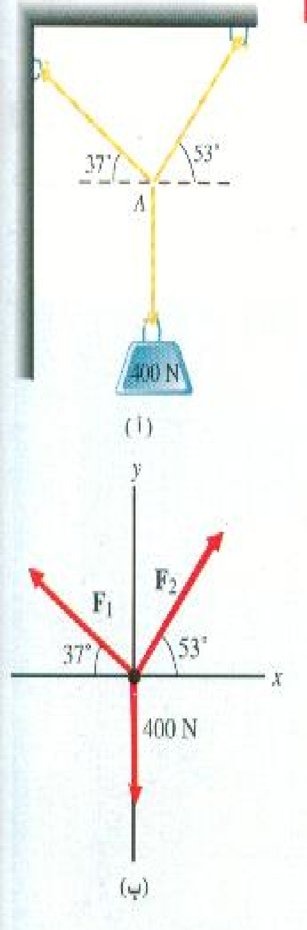
(د) $$0.64\,F_2 + 0.48\,F_1 - 320\ \mathrm{N} = 0$$

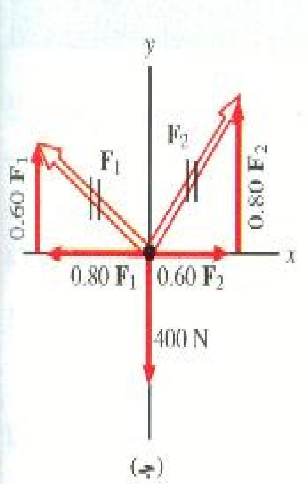
وبجمع المعادلتين (جـ) ، (د) نحصل على :

$$1.00F_2 - 320\ \mathrm{N} = 0 \qquad F_2 = 320\ \mathrm{N}$$

وبالتعويض عن قيمة F_2 فى المعادلة (جـ) :

$$0.48\,F_1 = (0.36)(320\ \mathrm{N}) \qquad F_1 = 240\ \mathrm{N}$$





شكل 3-4 : حيث أن نقطة تلاقى الحبلين فى الجزء (أ) من الشكل فى حالة اتزان ، فإن القوى المؤثرة فى الاتجاه y فى الجزء (جـ) يجب أن تتلاشى مع بعضها البعض . هذا ينطبق أيضاً على القوى المؤثرة فى الاتجاه x .

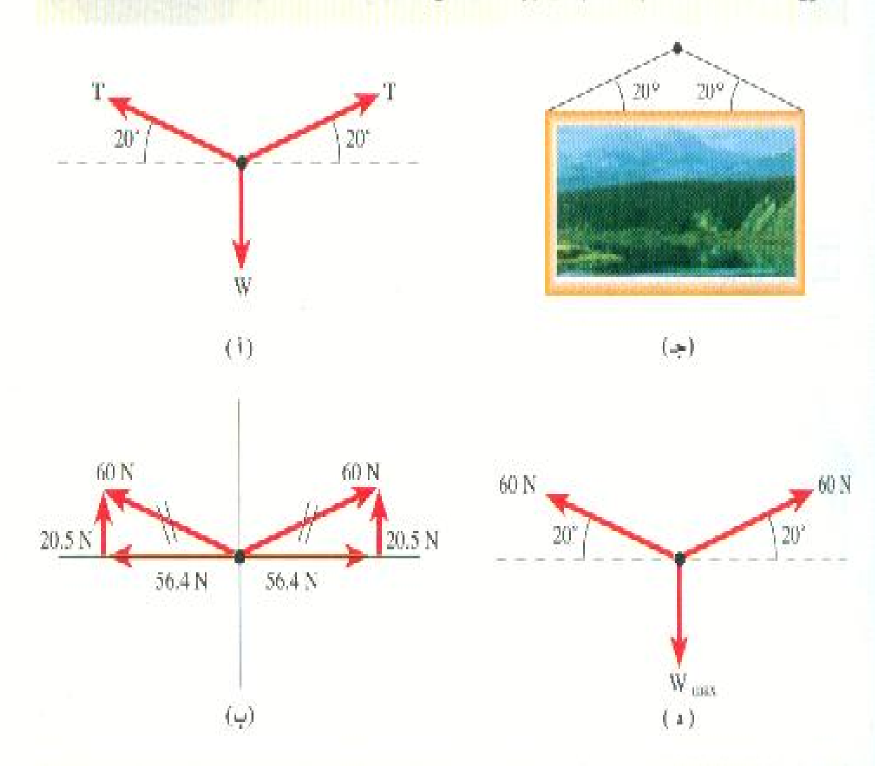
الطريقة (2) : التعويض عن أحد المجهولين في صالح الآخر . بحل المعادلة (أ) بالنسبة F_1 بدلالة F_2 نحصل على $F_1 = 0.75\ F_2$. وبالتعويض عن هذه القيمة في المعادلة (ب) نجد أن :

$$0.80F_2 + (0.60)(0.75F_2) - 400\ \mathrm{T} = 0$$

ومنه نجد أن $F_2 = 320\ \mathrm{N}$. وأخيرًا بالتعويض عن قيمة F_2 في المعادلة (أ) نحصل على F_1 ؛ $F_1 = 240\ \mathrm{N}$.

مثال 4-3 :

الشكل 4-4 يمثل صورة معلقة على حائط باستخدام حبلين يصنع كل منهما زاوية قدرها 20° مع الأفقي . فإذا كان كل حبل لا يتحمل شدًا يزيد عن 60 N ، فما هو أقصى وزن لصورة يمكن أن يحملها الحبلان بهذا الشكل ؟



شكل 4-4 :

صورة معلقة والمخططان البيانيان للجسم الحر يبسط الرسم : اختصرت الصورة إلى نقطة ؛ والوزن والشدان في الخيطين ينبعان من هذه النقطة .

استدلال منطقي :

سؤال : ما علاقة أقصى وزن للصورة بقيمتي الشد في الخيطين ؟

الإجابة : لاحظ في الشكل 4-4أ أن الحبلين يلعبان دورين متماثلين ، ومن ثم يمكننا أن نفرض أن الشدين فيهما متساويان مهما كان وزن الصورة . معنى ذلك أن أقصى وزن للصورة هو ذلك الوزن الذي يسبب شدا قدره 60 N في كل خيط . ويمثل الشكل 4-4ب المخطط البياني للجسم الحر في الحالة العامة بفرض أن الشد في كل من الحبلين T . لاحظ أن الشد في الحبل المتصل بالجانب الأيسر للصورة متجه يمينًا إلى أعلى وأن الشد في الخيط الآخر متجه يسارًا إلى أعلى .

سؤال : ما هي المركبات المتعامدة لكل القوى المؤثرة ؟

الإجابة : الوزن W ويؤثر بأكمله في الاتجاه y ، أما مقدار مركبتي الشد في كل من

الخيطين فهما كما يأتى :

$$T_y = T\sin 20° = T(0.34) \qquad T_x = T\cos 20° = T(0.94)$$

سؤال : ما المبدأ الذى يربط أكبر وزن W_{max} بالشدين ؟

الإجابة : الشرط الأول للاتزان ينطبق هنا ، حيث $T = 60\ N$. وبهذه القيمة للشد T نجد من معادلتى المركبتين أن $T_x = 56.4\ N$ و $T_y = 20.5\ N$.

سؤال : ما المعادلات التى نحصل عليها من الشرط الأول ؟

الإجابة : العلاقة $\Sigma\mathbf{F}_x = 0$. تبين أن المركبتين الأفقيتين ، وقيمة كل من 56.4 N ، تلاشى إحداهما الأخرى كما هو مبين بالشكل 4-4د . أما العلاقة $\Sigma\mathbf{F}_y = 0$ فتصبح :

$$20.5\ N + 20.5\ N - W_{max} = 0$$

الحل والمناقشة : الإجابة هى $W_{max} = 41.0\ N$.

لاحظ أن الخيطين لا يمكنهما حمل ثقل يساوى مقاومة قطعهما عند ترتيبهما بهذا الشكل ، وكلما اقترب كل من الخيطين إلى الوضع الأفقى كلما قل الوزن الذى يمكنهما حمله بدون أن ينقطعا .

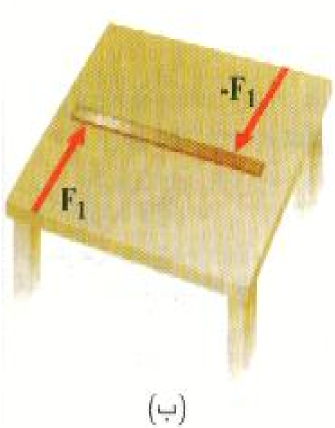
4-3 عزم الدوران

من الممكن أن يتحرك جسم حتى إذا تحقق الشرط الأول للاتزان ، ذلك أن هناك شرط ثان لابد من تحققه حتى يكون الجسم فى حالة اتزان استاتيكى . ومن السهل إيضاح ذلك بالرجوع إلى الشكل 5-4 الذى يمثل مسطرة مترية على سطح منضدة . هذه المسطرة فى حالة اتزانه فى الجزء (أ) من الشكل لأن قوة الجاذبية إلى أعلى (متزنة) مع دفع المنضدة إلى أسفل ، أى أن $\Sigma\mathbf{F} = 0$.

لنتأمل الآن ما يحدث إذا ما دفعت المسطرة بالقرب من طرفيها بقوتين متساويتى القدار ومتضادتى الاتجاه : $\mathbf{F}_1$ و $-\mathbf{F}_1$: فى هذه الحالة لن تبقى المسطرة ساكنة ، فبالرغم من أن $\mathbf{F}_1$ تتزن مع $-\mathbf{F}_1$ بحيث يتحقق الشرط $\Sigma\mathbf{F} = 0$ فإن المسطرة تبدأ فى الدوران . إذن ، يجب أن يوجد شرط آخر ، متعلق بالدوران ، يلزم تحققه حتى يصبح الجسم فى حالة اتزان استاتيكى ، وسوف نناقش الشرط الثانى (والأخير) للاتزان فى القسم التالى ، ولكن علينا أولاً مناقشة كيف تسبب القوى دوران الأجسام .



(أ)



(ب)

شكل 5-4 :
بالرغم من $\Sigma\mathbf{F} = 0$ للمسطرة فإنها ليست فى حالة اتزان فى (ب) .

لدراسة علاقة القوى بالدوران يمكن إجراء التجربة الموضحة بالشكل 6-4 الذى يمثل عجلة مكونة من قرصين ملتصقين معًا يمكنهما الدوران بحرية حول محور ثابت يسمى محور الدوران . وبتعليق جسمين فى الحبلين كما بالشكل يمكن تعيين التأثير الدورانى للقوة . فالقوة $\mathbf{F}_2$ تحاول تدوير العجلة فى اتجاه دوران عقارب الساعة ، بينما تحاول $\mathbf{F}_1$ تدويرها فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة . وبإجراء هذه التجربة عدة مرات باستخدام قيم مختلفة لنصفى قطر القرصين r_1 و r_2 نجد أن التأثير الدورانى لأحد القرصين يتزن مع التأثير الدورانى للآخر حينما يكون :

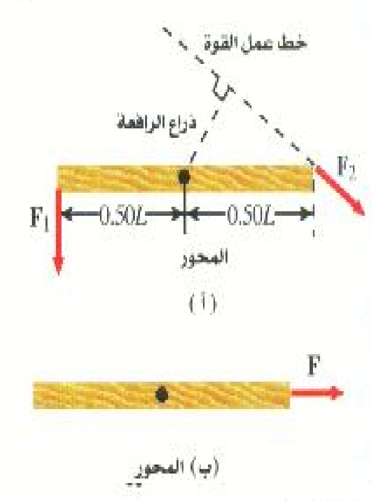
$$r_1F_1 = r_2F_2$$

من الواضح إذن أن التأثير الدورانى يعتمد على كل من مقدار القوة وبعدها عن محور الدوران .

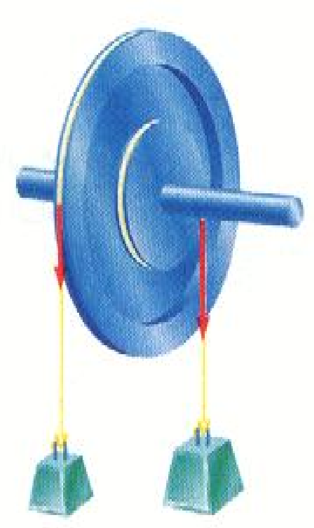
ويمكن تعلم المزيد عن التأثيرات الدورانية من الشكل 7–4 ، وواضح من هـذا الشكـل أن المسطرة يمكنها أن تدور بحرية حول محور ما بمركزها تحت تأثير القوتين $\mathbf{F}_1$ و $\mathbf{F}_2$.

وتبين التجارب أن النظام يتزن عندما يحقق مقدار الشرط الآتى :

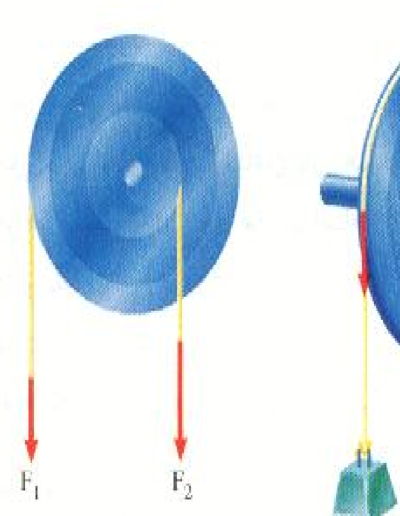
$$(0.5\,L)(\mathbf{F}_1) = \text{ذراع الرافعة} \times \mathbf{F}_2$$



شكل 7–4 :
التأثير الدورانى لقوة ما حول المحور يعتمد على حاصل ضرب القوة فى ذراع الرافعة . مـــا التأثير الدورانى للقوة فى الجزء (ب) ؟



(أ) شكل منظورى



(ب) منظر أمامى

شكل 6–4 :
كيف يجب أن تكون العلاقة بين $\mathbf{F}_1$ و $\mathbf{F}_2$ حتى لا تدور العجلة .

حيث يفهم معنى « ذراع الرافعـة » مـن الشكـل 7–4 . وبدلالـة « خـط (عمـل) القـوة » (وهو خط لانهائى ينطبق عليه متجه القوة) يمكن تعريف ذراع الرافعة كما يأتى :

ذراع الرافعة لقوة ما هو المسافة العمودية بين محور معين والخط الذى تؤثـر القـوة علـى استقامته .

يسمى التأثير الدورانى لقوة حول محور ما بعزم الدوران حول ذلك المحـور ويعـرف كمـا يأتى :

عزم الدوران الناتج بواسطة قوة حول محور يساوى حاصل ضرب القوة فى ذراع الرافعة لهذه القوة : القوة × ذراع الرافعة = τ .

من الحالات الهامة لعزم الدوران تلك الحالة التى يكون فيها خط عمل القوة مـارًا بـالمحور كما فى الشكل 7–4ب . عندئذ يكون ذراع الرافعة صفرًا ، ومن ثم :

$$\tau = 0 \times F = 0$$



تسبب القوة المماسية للماء الساقط عـزم دوران حـول محـور دوران (دنجـل) الساقية .

إذن ، عندما يمر خط عمل القوة بالمحور يكون عزم الدوران نتيجة لهذه القوة حول ذلك المحور صفرًا .

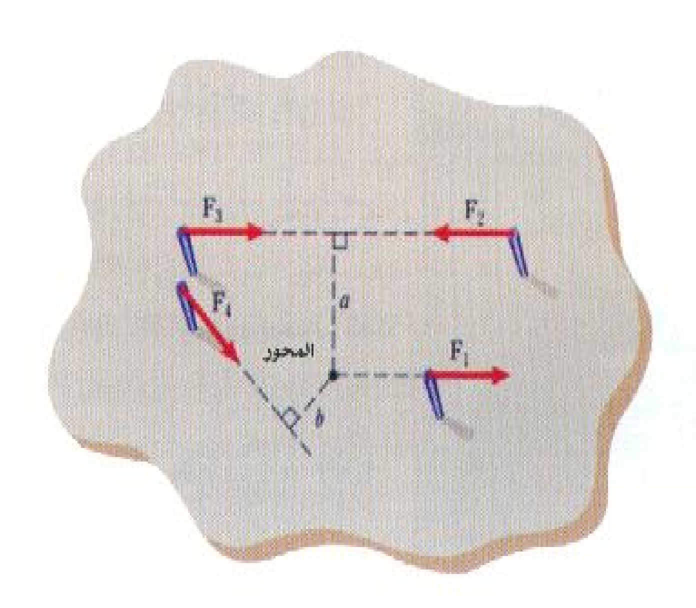
أما عن وحدات عزم الدوران فهى وحدات المسافة مضروبة فى وحدات القوة ، وهى النيوتن . متر (m.N) فى نظام الوحدات SI .

بالرجوع إلى الشكلين 4-6 و 4-7 نلاحظ أن القوتين $\mathbf{F}_1$ و $\mathbf{F}_2$ تميلان إلى تدوير الجسمين فى اتجاهين متضادين ، ومن ثم يجب علينا معاملة عزمى الدوران الناتجين عن القوتين باعتبارهما متعاكسين . معنى هذا أن عزم الدوران مرتبط دائمًا **باتجاه** ما . ولكن إذا كان المحور ثابتًا لن يوجد سوى اتجاهان اثنان (متعاكسان) فقط للدوران حول ذلك المحور ، ويوصف هذان الاتجاهان بأن أحدهما فى اتجاه دوران عقارب الساعة وأن الآخر فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة . ويمكن أن يؤخذ اتجاه عزم الدوران فى الاعتبار بتخصيص إحدى الإشارتين الموجبة أو السالبة للعزوم التى تميل إلى تدوير الجسم فى أحد الاتجاهين وتخصيص الأخرى للعزوم التى تنتج دورانًا معاكسًا . ومن المتبع عادة أن يميز اتجاه عزم الدوران بالطريقة الآتية :

تعتبر عزوم الدوران التى تميل إلى إحداث دوران فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة (ccw) موجبة القيمة . أما عزوم الدوران التى تميل إلى إحداث دوران فى اتجاه دوران عقارب الساعة (cw) فتعتبر سالبة القيمة .

مثال توضيحى 4-1

أوجد ذراع الرافعة وعزم الدوران لكل من القوى الموضحة بالشكل 4-8 .



شكل 4-8 :
أوجد ذراع الرافعة وعزم الدوران لكل قوة بالنسبة إلى المحور .

استدلال منطقى :

طبقًا للتعريف ، ذراع الرافعة للقوة F_1 يساوى صفرًا ، a للقوتين F_2 و F_3 ويساوى b

للقوة F_4 . وباستخدام اصطلاح الإشارات السابق ذكره نجد أن عزوم الدوران كما يأتى :

$F_1 \quad 0$

$F_2 \quad +a\,F_2$

$F_3 \quad -a\,F_3$

$F_1 \quad +b\,F_4$

4-4 الشرط الثانى للاتزان

والآن بعد أن عرفنا كيف نعبر عن التأثير الدورانى للقوة بدلالة عــزم الـدوران أصبح من السهل علينا صياغة الشرط الثانى والأخير للاتزان الاستاتيكى . وقد أثبتت التجارب الدقيقة أنه لكى يصل الجسم ساكنًا يجب أن تتوازن عزوم الدوران المؤثـرة علـى الجسـم فى اتجاه دوران عقارب الساعة مع عزوم الدوران فى عكس اتجاه عقارب الساعة .

لكى يكون الجسم فى حالة اتزان اسـتاتيكى يجـب أن يكـون المجمـوع الجـبرى لعـزوم الـدوران المؤثرة على الجسم فـى اتجاه دوران عقارب الساعة وفـى عكـس اتجاه دوران عقارب الساعة صفرًا .

هذه الصيغة هى **الشرط الثانى للاتزان** .

ويمكن كتابة هذا الشرط فـى الصـورة الرياضيـة باسـتخدام التمثيـل الرمـزى $\Sigma\tau$ للتعبير « مجموع جميع عزوم الدوران » . عندئذ يأخذ الشرط الثانى للاتزان الصورة :

$$\Sigma\tau = 0$$

بهذا أصبحت كل شروط اتزان الجسم معروفة* . وتلخص هذه الشروط فى بعدين كالآتى :

$$\Sigma F_x = 0 \qquad \Sigma F_y = 0 \qquad \Sigma\tau = 0 \qquad (4-2)$$

يستخدم المصطلحان « **العزم** » و « **عزم القوة** » بدلاً من عزم الدوران ، وفى تلك الحالـة كثيرًا ما يسمى ذراع القوة **بذراع العزم** ، وهما بالطبع مفهوم واحد .

فى التطبيقات السابقة لقانون نيوتن الثانى ، وكذلك عند تطبيق الشرط الأول للاتزان ، لم يكن مُهمًا أين نبين مختلف القوى المؤثرة على الجسم فى المخطط البيانى للجسم الحـر . ولكن هذا لا يكون صحيحًا عند حساب عزوم الدوران أو تطبيق الشرط الثـانى للاتـزان . من المهم جدًا أن نتذكر ما يأتى :

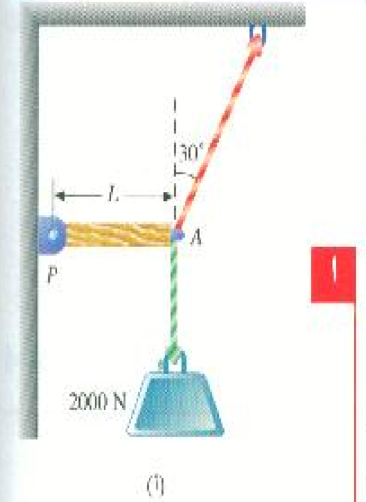
عند استخدام الشرط الثانى للاتزان من الضرورى أن يبين الوضع الصحيح للقوى المؤثـرة على الجسم فى المخطط البيانى للجسم الحر الخاص به .

---

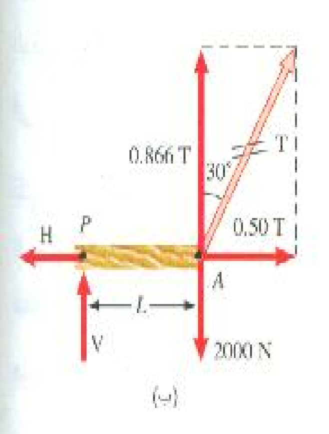
* افترضنا ضمنيًا خلال هذه المناقشة أن حركة الجسم المعنى مقيـدة فـى مستوى ، أى فـى بعديـن . والحقيقة أن كثيرًا من الحالات الـهامة تنتمى إلى هذا النوع .

مثال 4-4 :

نرى من الشكل 9-4 قضيبًا طوله L يمكنه الدوران حول أحد طرفيه (P) ويحمل جسمًا وزنه 2000 N فى الطرف الآخر . أوجد الشد فى السلك الحامل ذى اللون الأحمر .



(أ)



(ب)

شكل 9-4 :
عزل القضيب باعتباره الجسم الجارى مناقشته ، والمخطط البيانى للجسم الحر الخاص به مبين فى الجزء (ب) . يفترض أن وزن القضيب مهمل .

استدلال منطقى :

سؤال : لأى جسم يجب رسم المخطط البيانى للجسم الحر ؟

الإجابة : حيث أن المطلوب هو إيجاد الشد فى السلك الأحمر يجب علينا اختيار جزء من النظام يتصل به هذا السلك ، إما القضيب أو السقف . وحيث أن تحديد القوى المؤثرة على القضيب أسهل من السقف ، فالقضيب إذن هو أفضل اختيار .

سؤال : ما القوى المؤثرة على القضيب ؟

الإجابة : الشد فى كل من السلكين وأى قوى يؤثر بها الحائط على المحور P . (نص المسألة يخبرنا أن وزن القضيب مهمل) .

سؤال : كيف نعلم القوى المؤثرة بواسطة الحائط ؟

الإجابة : هذا غير ممكن فى البداية ، ولكن يمكن تعيين قوة رأسية ما V وأخرى أفقية H .

سؤال : ماذا يحدث عند تمثيل اتجاههما فى المخطط البيانى للجسم الحر بطريقة غير صحيحة ؟

الإجابة : إذا حدث فإننا سنحصل على مقدار القوة بإشارة سالبة ، وهذا يفيد بأننا اخترنا الاتجاه المعاكس . بأسلوب آخر ، سيكون كل شىء على ما يرام حتى إذا اخترنا الاتجاه الخطأ وأن ذلك لن يؤثر على إشارة الإجابة ، وسيكون بالإمكان تغيير الإشارات كما نريد عند إجراء الحسابات .

سؤال : هل يمكن تعيين الشد فى السلك السفلى ؟

الإجابة : نعم . فالشد هو القوة الوحيدة التى تحمل الوزن 2000 N . إذن ، هذا الشد يجب أن يساوى 2000 N . وسيكون المخطط البيانى للجسم الحر بعد الإجابة عن كل هذه الأسئلة كما هو مبين بالشكل 9-4ب . لاحظ أن القضيب كله ظاهر بالشكل ، ومن ثم يمكن وضع القوة المؤثرة فى مكانها الصحيح فى المخطط البيانى للجسم الحر .

سؤال : ما هى المعادلات الناتجة من الشرط الأول للاتزان ؟

الإجابة : $\Sigma F_x = 0 : \quad -H + (0.5)T = 0$

$$\Sigma F_y = 0 : (0.866)T + V - 2000\text{ N} = 0$$

ولأن لدينا ثلاثة مجاهيل هو T ، V ، H فإننا نحتاج إلى معادلة ثالثة تحتوى على نفس المجاهيل .

سؤال : ما المبدأ الآخر الذى يمكن تطبيقه ؟

الإجابة : الشرط الثانى للاتزان ، $\Sigma\tau = 0$.

سؤال : ما المحور اللازم اختياره لحساب عزوم الدوران ؟

الإجابة : أى محور يؤدى الغرض* ، ولكن إذا اخترنا محورًا عموديًا على الصفحة بحيث يمر بالنقطة P فإن خطوط عمل القوتين H و V والمركبة الأفقية للقوة T سوف تمر بالمحور ويكون عزم دوران كل منها صفرًا .

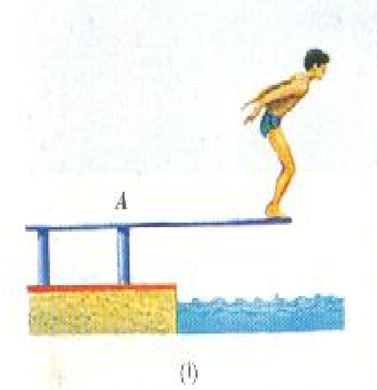
سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها ؟

الإجابة : باستخدام اصطلاح إشارات عزوم الدوران نحصل على المعادلة :

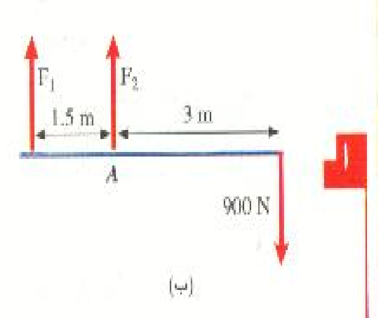
$$-(2000\ \text{N})L + (0.866T)L = 0$$

الحل والمناقشة : باستخدام المعادلة الأخير نجد أن $T = 2310\ \text{N}$. وقد حصلنا فى هذه الحالة على النتيجة المطلوبة من معادلة عزم الدوران وحدها ! ويمكنك إن شئت التعويض عن قيمة T فى معادلتى المركبتين x و y وحلهما بالنسبة إلى H و V .

تمرين : أوجد H و V فى الشكل 9-4 . **الإجابة** : $H = 1150\ \text{N}, V = 0$.



(أ)



(ب)

شكل 10-4 :
رجل وزنه 900 N واقف على طرف لوح القفز . نحن نخمن أن القائمين يؤثران على اللوح بقوتين اتجاههما كما هو مبين بالشكل . ومن الواضح أن تخميننا لاتجاه إحدى القوى غير صحيح .

مثال 5-4 :

الرجل الموضح فى الشكل 10-4 وزنه 900 N على وشك القفز فى الماء من فوق لوح القفز . أوجد القوى التى يؤثر بها القائمان على اللوح . افترض أن وزن اللوح مهمل .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى القوى المؤثرة على اللوح ؟

الإجابة : وزن الرجل إلى أسفل والقوتان الرأسيتان اللتان يؤثر بهما القائمان .

سؤال : وزن الرجل معلوم ، ولكن قوتى القائمين غير معلومتين . فى أى اتجاه تؤثر قوتا القائمين .

الإجابة : نحن لا نعلم اتجاهى القوتين ، ولكننا نعلم بالتأكيد أن **واحدة** منهما على الأقل يجب أن تكون إلى أعلى وإلا أنهار اللوح . وتجدر الإشارة مرة أخرى إلى أننا إذا اخترنا اتجاهًا خاطئًا لأى قوة مجهولة فى المخطط البيانى للجسم الحر فإن كل ما سوف يحدث هو أننا سنحصل على قيمة سالبة لمقدارها . وهذا ويوضح المخطط البيانى للجسم الحر الخاص باللوح (شكل 10-4ب) أحد الاختيارات الممكنة للقوتين F_1 و F_2 .

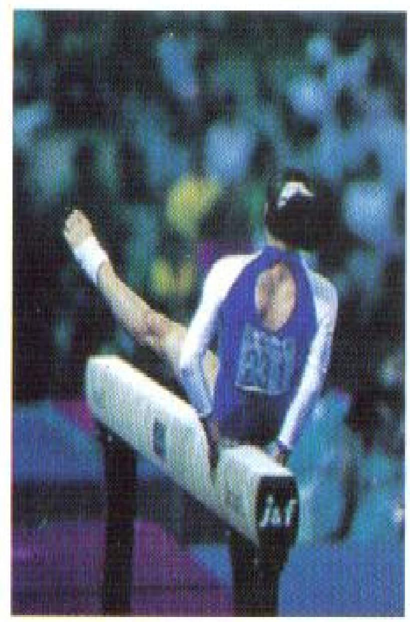
سؤال : ماذا ينتج من الشرط الأول للاتزان ؟

الإجابة : لا يوجد أى قوى أفقية هنا ، إذن ، من الشرط $\Sigma \mathbf{F}_y = 0$ نجد أن :

$$F_1 - 900\ \text{N} + F_2 = 0$$

* تبرير ذلك تفصيلا هو موضوع القسم 6-4 .





لكى تبقى لاعبة الجمباز علـــى عارضة التوازن يجب عليها أن تحتفظ بمركز ثقلها فوق العارضة . وبمجرد أن يزاح مركـــز الثقل إلى إحد جانبى العارضـــة ســيصبح الوقوع أمرًا لا مفر منه .

سؤال : أى محور نختار لحساب عزوم الدوران ؟

الإجابة : مرة أخرى ، أى محور يؤدى الغرض . لنختر على سبيل المثـال محورًا يمر بالنقطة A وهى نقطة اتصال أحد القائمين باللوح .

سؤال : ما النتيجة التى نحصل عليها من تطبيق الشرط الثانى باستخدام هذا المحور ؟

الإجابة : $-(900\ \text{N})(3\ \text{m}) - F_1(1.5\ \text{m}) = 0$

لاحظ أن F_2 لا تظهر فى هذه المعادلة لأنها لا تخلق عزم دوران حول المحور الذى اخترناه .

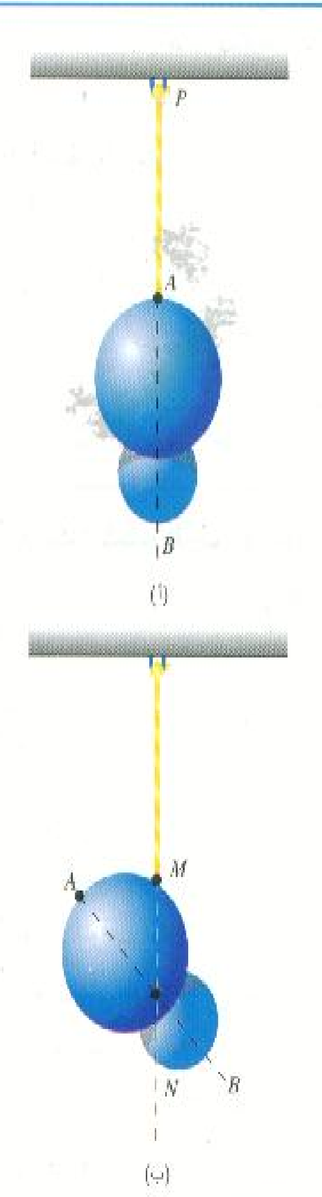
الحل والمناقشة : معادلة عزم الدوران تعطـى $F_1 = -1800\ \text{N}$. وتبـين هـذه النتيجـة السـالبة أن اتجاه F_1 **معاكس لما اخترناه فى المخطط البيانى للجسم الحـر** . وبـالتعويض بهذه القيمة فى معادلة القوى نجد أن :

$$F_2 = 900\ \text{N} - (-1800\ \text{N}) = 2700\ \text{N}$$

وحتى بهذا الاختيار الخاطئ لاتجاه القوة F_1 فإننا نحصـل علـى الإجابـات الصحيحـة طالما التزمنا بالإشارات فى إجراء العمليات الجبرية .

4–5 مركز الثقل

تفادينا فى المثالين 4–4 ، 4–5 تعقيدين اثنين كان أولـهما اختيـار محـور لحسـاب عزوم الدوران حوله ، وأكدنا بدون تبرير أن أى محور نختـاره يفـى بـالغرض ؛ وسـوف يناقش هذا الموضوع فى القسم 4–6 . وتفادينـا التعقيـد الثـانى بـأن فرضنـا أن القضيـب ولوحة القفز يمكن إهمـال وزنـهما . ولأن هـذا الفرض ليـس صحيحًـا عمومًـا وفـى كـل الحالات ، يلزم الآن دراسة كيف يؤخذ الوزن فـى الاعتبـار عنـد تطبيـق الشـرط الثـانى للاتزان . بمعنى آخر ، أين توجد نقطة تأثير قـوة الجاذبيـة علـى الجسـم حتـى يمكـن حساب ذراع الرافعة لـها بالنسبة إلى المحور المختار ؟

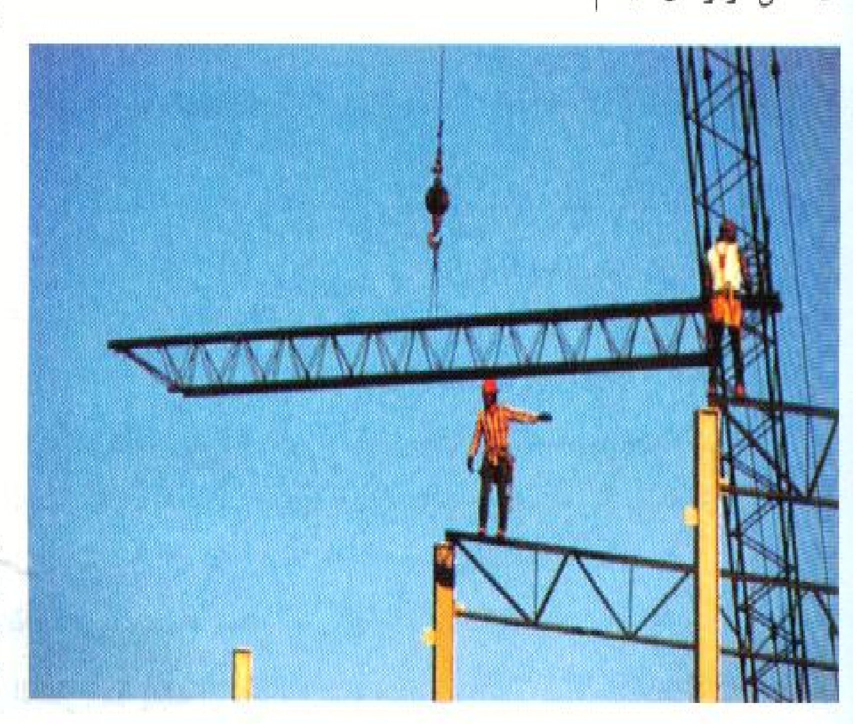


شكل 11-4 :
طريقة عملية لتعيين مركز ثقل جسم .

من الطبيعي أن الجاذبية الأرضيـة تؤثر على جميع أجزاء أى جسم . ولكن فى حسابات عزوم الدوران يبدو أن قوة الجاذبية (وزن الجسم) تؤثر فى نقطة واحدة فيه ، وسوف نسمى هذه النقطة **مركز ثقل (c.g)** الجسم . لنرى الآن كيف يعين موقع هذه النقطة عمليًا .

لنفرض أننا نريد تعيين موضع مركز ثقل الجسم المبين بالشكل 11-4 . لتحقيق ذلك يعلق الجسم أولاً فى خيط متصل بأى نقطة على الجسم ولتكن A ، ولنعتبر أن الخيط حر الدوران حول محور مار بالنقطة P . إذا ترك الجسم المعلق فترة كافية فإنه سوف يتخذ وضع الاتزان المبين بالشكل نتيجة لاتزان القوى وعزوم الدوران المؤثرة عليه . هناك قوتان مؤثرتان فقط على الجسم هما قوة الجاذبية وتؤثر رأسيًا إلى أسفل والشد فى الخيط واتجاهه رأسى إلى أعلى . علاوة على ذلك فإن المجموع الاتجاهى لهاتين القوتين يساوى صفرًا لأن النظام فى حالة اتزان . وحيث أن الخيط يمر بالنقطة P فإن عزم دوران قوة الشد حول P يساوى صفرًا . وعليه ، فلكى يكون **مجموع** عزمى الدوران حول P صفرًا لابد أن يكون عزم الدوران حول P نتيجة للجاذبية مساويًا للصفر ، هذا يكون صحيحًا فقط إذا كان **صافى تأثير** الجاذبية مؤثرًا فى اتجاه الخط AB بالشكل 11-4 أ ، والمار بالنقطة P .

لنقم الآن بتعليق الجسم من نقطة أخرى M كما بالشكل 11-4ب . باستخدام نفس المنطق السابق يمكن استنتاج أن الجاذبية تؤثر على استقامة الخط MN ولكننا نعلم جميعا أن هناك نقطة واحدة مشتركة بين الخطين AB و MN هى بالتحديد نقطة تقاطعهما C . معنى ذلك أن C هى نقطة تأثير الجاذبية فى كلتا الحالتين . ويمكن التحقق من ذلك بتعليق الجسم من نقطة ثالثة وتكرار نفس التجربة ، وعندئذ سنجد أن هناك خطًا رأسيًا يمر بنقطة التعليق الثالثة ويمر أيضًا بالنقطة C ويستنتج من ذلك إذن أن C هى مركز ثقل الجسم .



ترفع هذه العارضة بسلك واحد يقع على استقامته مركز ثقلها . وحيث أن صافى عزم الدوران المؤثر على العارضة يساوى صفرًا فإنها تظل مستوية أثناء عملية الرفع .

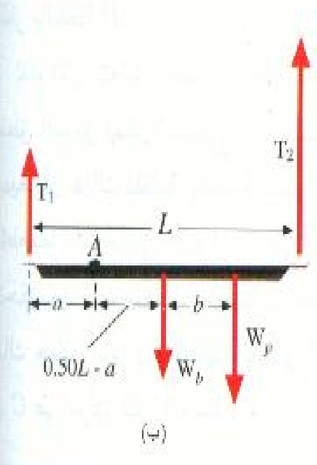
مركز ثقل الجسم هي تلك النقطة التي يمكن اعتبارها بمثابة نقطة تأثير لقوة الجاذبية المؤثرة على الجسم عند حساب عزم الدوران الذي تسببه حول أي محور مختار .

وبالنسبة للأجسام ذات التماثل البسيط ، كالقضبان والكرات والمكعبات والمصنوعة من مواد متجانسة يقع مركز الثقل في المركز الهندسي . وليس من الضروري أن تكون هذه النقطة نقطة فيزيائية داخل مادة الجسم . فمركز ثقل الطوق المصنوع من مادة منتظمة على سبيل المثال يقع في مركزه الهندسة بالرغم من أن كل مادته موجودة حول الحافة .

4-6 موضع المحور اختياري



(أ)



(ب)

شكل 12-4 :
موضع المحور اختياري .

غالبًا ما يكون للجسم الموجود في حالة اتزان محور دوران واضح ، وعادة ما يستخدم هذا المحور لحساب عزوم الدوران . ولكن مثل هذا المحور الواضح لا يكون موجودًا في كثير من المواقف . وسوف نرى في هذا القسم أن لدينا الحرية كاملة في اختيار **أي** محور نراه مناسبًا عند تطبيق الشرط الثاني للاتزان . ومن بين الأدلة على ذلك أن الجسم في حالة الاتزان لا يدور حول **أي** محور سواء كان داخل الجسم أو خارجه ، وعليه فإن مجموع عزوم دوران القوة المؤثرة على جسم حول **أي** (**وكل**) محور يجب أن يكون صفرًا . ولكننا مع ذلك سنطرح هذا الاستدلال العام جانبًا ونحاول إثبات النتيجة رياضيًا .

لندرس الموقف المبين بالشكل 12-4 الذي يمثل رسام إعلانات وزنه W_p واقفًا في حالة اتزان على لوح خشبي منتظم وزنه W_b وطوله L . مركز ثقل هذا اللوح يقع في مركزه الهندسي ، ولهذا فإن W_b يؤثر عند هذه النقطة كما هو واضح في الشكل 12-4ب . ولنفرض أن الشدين في السلكين الحاملين T_1 و T_2 . سوف نثبت الآن أن الصورة الأخيرة لمعادلة عزوم الدوران لحالة الاتزان هذه لا تعتمد على المحور المختار .

بأخذ خط مار بالنقطة A كمحور ، عليك إثبات أن معادلة عزوم الدوران $\Sigma\tau = 0$ ستصبح على الصورة :

$$-T_1(a) - W_b(0.50L - a) - W_p(0.50L - a + b) + T_2(L - a) = 0$$

وبتجميع الحدود المحتوية على الطول الاختياري a :

$$-a(T_1 - W_b - W_p + T_2) - 0.50\, W_b L - W_p(0.50L + b) + T_2 L = 0$$

ويمكن بسهولة إثبات أن معامل a في هذه المعادلة يساوي صفرًا بشرط أن يكون النظام في حالة اتزان ذلك أن : $\Sigma \mathbf{F}_y = 0$ عند الاتزان ، إذن :

$$T_1 + T_2 - W_b - W_p = 0$$

وحيث أن هذا هو معامل ضرب a في المعادلة ، إذن الحد المعنى يساوي صفرًا ومن ثم فإن معادلة العزوم هي :

$$-0.50\, W_b L - W_p(0.50L + b) + T_2 L = 0$$

وهي لا تعتمد على a أو موضع المحور المختار . هذا يثبت أن موضع المحور اختياري

فى هذه الحالة على الأقل .

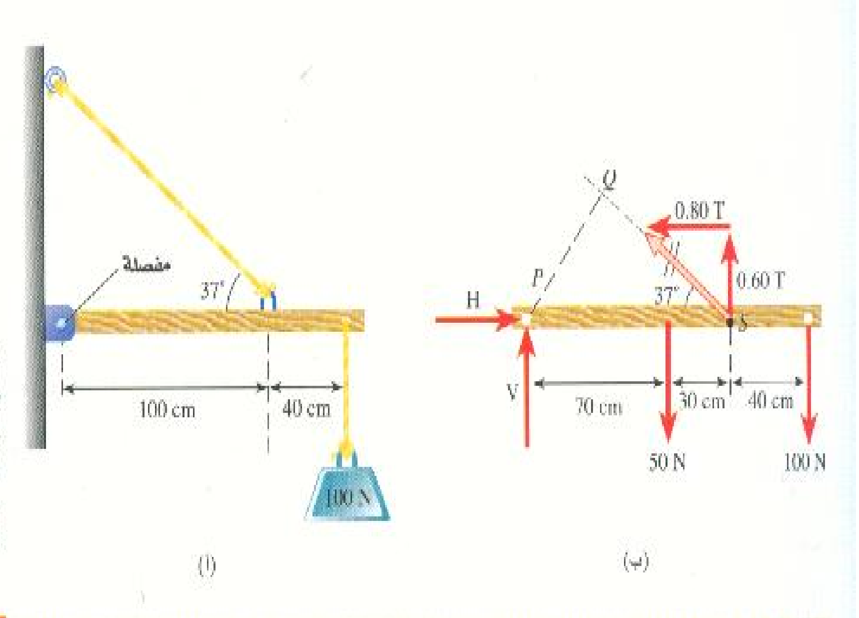
ومع أننا حصلنا على هذه النتيجة فى حالة خاصة معينة إلا أنه يمكن برهانها فى الحالة العامة . وبهذا نكون قد حصلنا على النتيجة العامة الآتية :

عند كتابة معادلة عزوم الدوران لجسم فى حالة اتزان يكون اختيار موضع المحور اختياريًا .

وعادة يختار المحور بحيث يمر به خط عمل قوة مجهولة ، وبهذا يصبح عزم دوران تلك القوة صفرًا ولا تظهر فى معادلة عزوم الدوران .

مثال 4-6 :

يمثل الشكل 13-4 عمودًا منتظمًا وزنه 50 N متصلاً بحائط عن طريق مفصلة . فإذا كان العمود فى حالة اتزان استاتيكى ، فما مقدار الشد فى السلك العلوى ؟ وما هما المركبتان الأفقية والرأسية للقوة التى تؤثر بها المفصلة على العمود ؟



شكل 13-4 : القوى المؤثرة على العمود فى الجزء (أ) موضحة بالتفصيل فى الجزء (ب) . لاحظ أن المركبة $0.6\,T$ تؤثر على العمود إلى أعلى عند النقطة S ، وعليه فإن ذراع الرافعة لهذه القوة حول P يساوى 100 cm .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن تحديد جميع القوة المؤثرة على العمود وتمثيلها فى المخطط البيانى للجسم الحر ؟

الإجابة : الشد فى السلك العلوى يؤثر عند نقطة اتصاله بالعمود S فى اتجاه السلك والقوة 100 N تؤثر رأسيًا إلى أسفل عند طرف العمود ، كما يؤثر وزن العمود وقدره 50 N رأسيًا إلى أسفل عند منتصف العمود . أما الحائط فإنه يؤثر بقوة ما على العمود عن طريق المفصلة ، ويمكن تمثيل هذه القوة عمومًا بمركبة رأسية V ومركبة أفقية H . بذلك يكون المخطط البيانى للجسم الحر كما هو مبين بالشكل 13-4ب . وإذا كان اختيارنا لاتجاهى H و V خاطئًا سوف نحصل من حلول معادلات الاتزان على قيم سالبة .

سؤال : هل يوجد اختيار واضح للمحور ؟

الإجابة : إذا اختير محور مار بالمفصلة عند P سيؤدى ذلك إلى تبسيط حسابات عزوم الدوران لأن القوتين H و P ليس لهما عزم دوران حول ذلك المحور .

سؤال : كيف يدخل الشد فى الحبل العلوى فى شرطى الاتزان ؟

الإجابة : هذه القوة تسهم فى الشرط الأول للاتزان بمركبة أفقية وأخرى رأسية ، كما أنها تنتج عزمًا حول المحور المار بالمفصلة فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة .

سؤال : ما هى المعادلات الناتجة من الشرط الأول ؟

الإجابة : بالنسبة للاتجاه الأفقى :

$$H - T_x = H - (0.80)T = 0$$

وبالنسبة للاتجاه الرأسى :

$$V + T_y - 50\ \mathrm{N} - 100\ \mathrm{N} = 0$$

أو :

$$V + (0.60)T - 150\ \mathrm{N} = 0$$

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من الشرط الثانى ؟

الإجابة : الوزنان يسهمان بعزمى دوران حول P فى اتجاه دوران عقارب الساعة ، أما القوة T_y فتسهم بعزم دوران فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة :

$$T_y\,(1.0\ \mathrm{m}) - (50\ \mathrm{N})(0.70\ \mathrm{m}) - (100\ \mathrm{N})(1.4\ \mathrm{m}) = 0$$

أو

$$(0.60)T(1.0\ \mathrm{m}) - 35\ \mathrm{m.N} - 140\ \mathrm{m.N} = 0$$

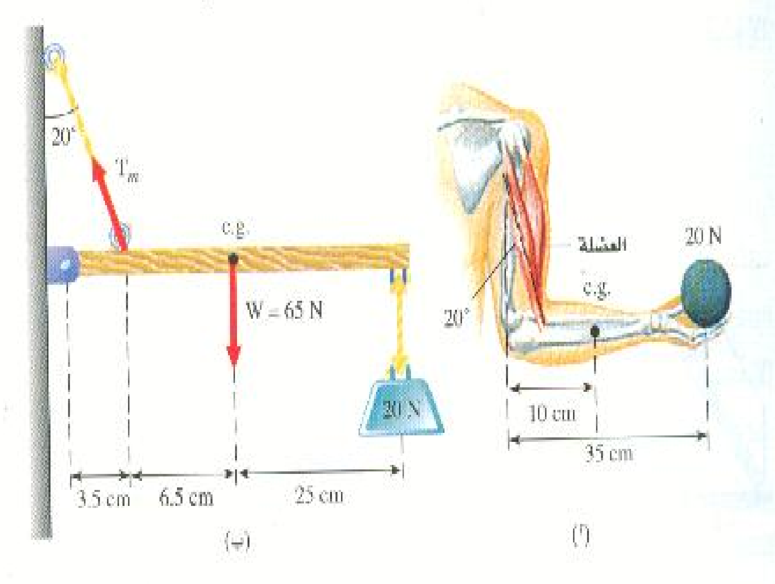
لاحظ أن المركبة الأفقية للقوة T تمر بالمفصلة ولذلك يكون إسهامها فى عزم الدوران صفرًا . لاحظ كذلك أن الوزنين يؤثران عند نقطتين مختلفتين على العمود ، وبذلك يكون ذراعا الرافعة لهما مختلفين .

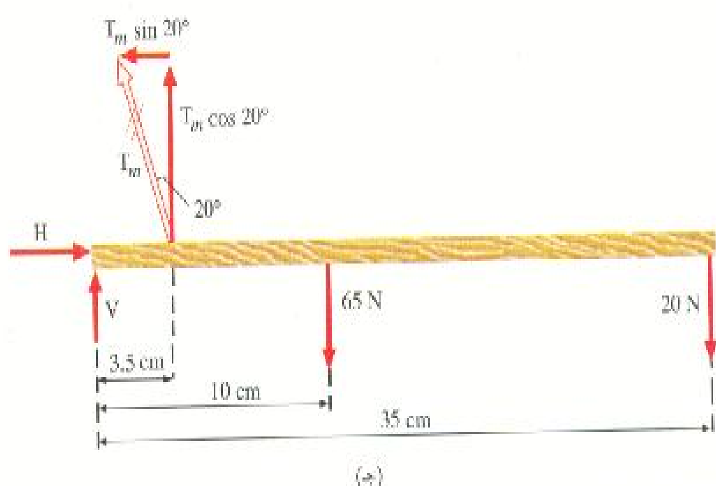
الحل والمناقشة : لاحظ أن لدينا ثلاث معادلات فى ثلاثة مجاهيل هى T ، V ، H وطبقًا لمعطيات المسألة لا يمكن الاحتفاظ فى النتيجة بأكثر من رقمين معنويين . وبتطبيق معادلة عزوم الدوران نحصل مباشرة على الشد فى السلك $T = 290\ \mathrm{N}$. وبالتعويض عن T بهذه القيمة فى معادلتى القوى نجد أن $H = 230\ \mathrm{N}$ و $V = -24\ \mathrm{N}$. وحيث أننا عاملنا V كمتجه اتجاهه إلى أعلى فإن هذه النتيجة تخبرنا أن اتجاه V إلى أسفل .

مثال 7-4 :

يحمل شخص مقداره $20\ \mathrm{N}$ كما هو مبين بالشكل 14-4أ . أوجد الشد فى العضلة الحاملة ومركبتى القوة المؤثرة على الكوع ، علما بأن الخصائص المميزة للساعد والكف معًا (من الكوع حتى أطراف الأصابع) هى : الوزن $65\ \mathrm{N}$ ؛ الطول $35\ \mathrm{cm}$ ؛ مركز الثقل يقع بين الكوع والرسغ وعلى بعد $10\ \mathrm{cm}$ من الكوع ؛ العضلة مثبتة على بعد

3.5 cm من الكوع وتصنع زاوية قدرها 20° بالنسبة إلى الرأسى .





شكل 14–4 :
يمكن تحليل القوى المؤثرة فى الذراع البشرة باستخدام النموذجين الموضحين فى (ب) ، (جـ) .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الجسم المراد اعتباره فى حالة اتزان ؟

الإجابة : الساعد مع اليد . ومن المناسب اختيار محور مار بالكوع لحساب عزوم الدوران .

سؤال : ما هى القوى المؤثرة على الساعد ، وأين توضع فى المخطط البيانى للجسم الحر ؟

الإجابة : انظر الشكلين 14–4ب ، 13–4جـ حيث نستخدم هنا القوى الأساسية فقط والتى نستخرجها من الشكل 14–4أ . لاحظ التشابه مع حالة العمود فى المثال السابق . أى أن موقفين مختلفين قد أمكن اختزالهما إلى نفس المسالة ، وتكمن قوة الفيزياء فى قدرتها على التبسيط والتوحيد من خلال هذا النوع من الاختزال إلى الأساسيات .

سؤال : ما المعادلات التى نحصل عليها من شرطى الاتزان ؟

الإجابة : باستخدام الكوع كمحور لحساب عزوم الدوران نحصل على :

$$\Sigma F_x = 0 : H - T_m \sin 20^\circ = 0$$

$$\Sigma F_y = 0 : V + T_m \cos 20^\circ - 65\ N - 20\ N = 0$$

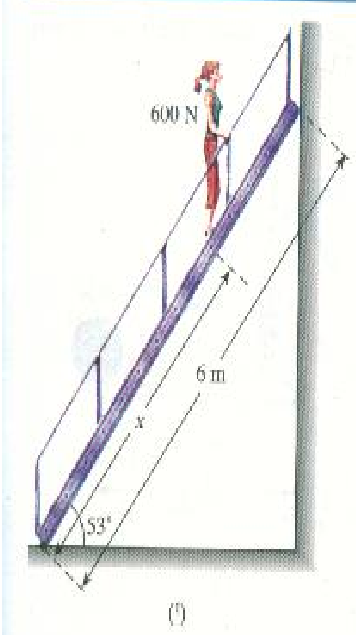
$$\Sigma \tau = 0 : (T_m \cos 20^\circ)(0.035\ m) - (65\ N)(0.10\ m) - (20\ N)(0.35\ m) = 0$$

الحل : من معادلة عزوم الدوران نجد أن $T_m = 410\ N$. وبالتعويض عن هذه القيمة فى معادلتى القوى نحصل على :

$$H = 140\ N \qquad V = -300\ N$$

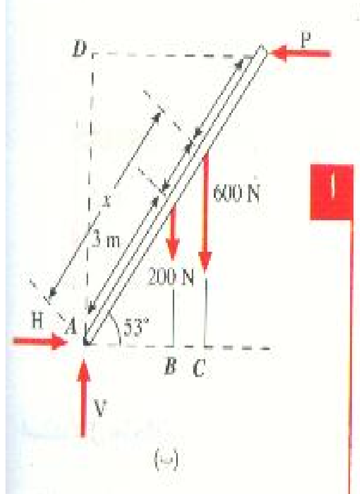
حيث تبين الإشارة السالبة أن اتجاه V إلى أسفل .

جميع هذه القوى أكبر من وزن الجسم المحمول . هل يمكنك إثبات أن T_m يصبح كبيرًا جدًا إذا مدت الذراع أفقيًا ، لماذا يكون من المتعب للغاية أن تحمل ثقلا فى يدك وهى ممتدة أفقيا ؟



مثال 4-8 :

يستند سلم منتظم طوله 6.0 m ووزنه 200 N على حائط بحيث يميل بزاوية قدرها 53° فوق الأفقى كما هو مبين بالشكل 15-4أ . يفترض هنا عدم وجود احتكاك بين السلم والحائط ، وأن معامل الاحتكاك الاستاتيكى بين السلم والأرضية هو $\mu_s = 0.55$. فإذا صعدت امرأة وزنها 600 N (135 lb) هذا السلم ببطء ، فما أقصى مسافة يمكن أن تصعدها المرأة على السلم ، مقاسة على استقامة السلم من قاعدته ، قبل أن يقع السلم ؟



شكل 15-4 :
امرأة وزنها 600 N تقف على سلم وزنه 200 N . بفرض أن الحائط أملس تكون القوى المؤثرة على السلم كما هو مبين فى الجزء (ب) .

استدلال منطقى :

سؤال : لماذا سيقع السلم إذا صعدت عليه المرأة إلى ارتفاع كبير ؟

الإجابة : كلما صعدت المرأة على السلم يتغير ذراع الرافعة لعزم الدوران الذى يخلقه وزنها حول أى محور مختار ، وهذا يؤثر على القوى المؤثرة على السلك عند الحائط والأرضية . ولكن إحدى هذه القوى المساهمة فى الاتزان ، وهى قوة الاحتكاك بين السلك والأرضية ، لها قيمة قصوى مسموحة . فإذا زادت هذه القوة عن القيمة القصوى سوف ينزلق السلم نتيجة للدوران فى اتجاه دوران عقارب الساعة .

سؤال : ما القوى التى تؤثر بها الأرضية والحائط على السلم ؟

الإجابة : الاحتكاك عند الأرضية يمكنه التأثير بقوة أفقية H إلى اليمين ، أما الأرضية ذاتها فتعطى قوة رأسية V إلى أعلى . أما الحائط ، وهو احتكاكى ، فيمكنه فقط أن يؤثر على السلم بقوة دفع أفقية P إلى اليسار .

سؤال : نعرف أين نضع وزن السلم ، ولكن كيف نحدد مكان وزن المرأة ؟

الإجابة : اعتبر أن وزنها يؤثر عامة على بعد قدره x من القاعدة . عندئذ سيكون المخطط البيانى للجسم الحر بالنسبة للسلم كما هو موضح بالشكل 15-4ب .

سؤال : ما الذى نبحث عنه فى نهاية الأمر لنعرف منه شرط انزلاق السلم ؟

الإجابة : المطلوب هو إيجاد تعبير يوضح كيف تعتمد قوة الاحتكاك H على موضع المرأة x باستخدام شرطى الاتزان . وعندئذ سيمكن إيجاد قيمة x المناظرة للقيمة العظمى المسموحة للقوة H .

سؤال : ما المعادلات الناتجة عن تطبيق الشرط الأول للاتزان ؟

الإجابة : من الشرط $\Sigma \mathbf{F}_x = 0$ نجد أن $H - P = 0$

إذن : $H = P$

ومن الشرط $\Sigma \mathbf{F}_y = 0$ نجد أن $200\ \text{N} + 600\ \text{N} - V = 0$

ومنه $V = 600\ \text{N}$

سؤال : أى المحاور نختار لحساب عزوم الدوران وما المعادلة الناتجة عن تطبيق الشرط الثانى ؟

الإجابة : كما سبق أن أشرنا ، يمكن تبسيط معادلة عزوم الدوران باختيار محور مار بأكبر عدد من القوى المؤثرة على الجسم ، وهو هنا محور يمر بالنقطة A فى الشكل 15-4ب . تحقق أن أذرع الرافعة للقوى حول A هى :

للنقطة P : $(6.0\ \text{m}) \sin 53° = 4.8\ \text{m}$

لوزن السلم : $(3.0\ \text{m}) \cos 53° = 1.8\ \text{m}$

لوزن المرأة : $x(\cos 53°) = 0.60\, x$

ومن معادلة عزوم الدوران $\Sigma \tau = 0$ نحصل على :

$$(4.8\ \text{m})P - (1.8\ \text{m})(200\ \text{N}) - (0.60x)(600\ \text{N}) = 0$$

سؤال : كيف يمكن الحصول على علاقة بين H و x ؟

الإجابة : لاحظ أن إحدى معادلتى القوى تعطى $H = P$. ومن ثم يمكن وضع H بدلاً من P فى معادلة عزوم الدوران وحلها بالنسبة إلى x بدلالة H :

$$(4.8\ \text{m})H - 360\ \text{m.N} - 360x\ \text{N} = 0$$

$$x = \frac{(4.8\text{m})H - 360\text{m.N}}{360\text{N}} = \left(\frac{H}{75}\right)\text{m/N} - 1\ \text{m}$$

سؤال : ما الشرط الذى يحدد القيمة العظمى للمسافة x (x_{max}) ؟

الإجابة : تبين المعادلة الأخيرة أن x تتناسب طرديًا مع H . إذن x_{max} تناظر H_{max} .

سؤال : بماذا تتعين H_{max} ؟

الإجابة : $H_{max} = \mu_s F_N$ ، حيث F_N القوة العمودية التى تؤثر بها الأرضية على السلم ، وقد سميناها V فى هذه المسالة ، ووجدنا أن $V = 800\ \text{N}$.

الحل والمناقشة : حيث أن $H_{max} = (0.55)(800\ \text{N}) = 440\ \text{N}$. إذن :

$$x_{max} = \frac{H_{max}}{75} - 1 = \frac{440}{75} - 1 = 4.9\ \text{m}$$

أى أن السلم سوف ينزلق عندما تصل المرأة إلى نقطة تبعد حوالى 1.1 m عن الطرف العلوى للسلم .

تمرين : ما أصغر قيمة لمعامل الاحتكاك μ_s تمكن المرأة من الصعود إلى الطرف العلوى للسلم ؟

الإجابة : μ_s يجب أن تساوى 0.66 على الأقل فى هذه الحالة .

مثال 9-4 :

لإيضاح أن اختيار المحور اعتباطى ، لنعد إلى المثال 8-4 ونختار هذه المرة محورًا مارًا بالنقطة B فى الشكل 15-4ب ، وهذا المحور يقع خارج السلم . تحقق أن هذا الاختيار يعطى نفس النتيجة التى حصلنا عليها باستخدام محور مار بالنقطة A .

استدلال منطقى :

سؤال : ما القوى التى ليس لها عزم دوران حول B ؟

الإجابة : H ووزن السلم لأنه يمر بالنقطة B .

سؤال : ما هى أذرع الرافعة للقوى الأخرى حل B ؟

الإجابة : بالنسبة للنقطة B ، نفس القيمة : 4.8 m

بالنسبة للقوة V : $(3\text{ m})\cos 53° = 1.8\text{ m}$

بالنسبة لوزن المرأة : $(x - 3\text{ m})\cos 53° = (0.60)x - 1.8\text{ m}$

ويبين المخطط البيانى أن $x > 3\text{ m}$. ولكن إذا كان اختيارنا خاطئًا وجدنا أن x أقل من 3 m فإن إشارة ذراع الرافعة سيصبح سالبًا ، وهذا يعكس اتجاه عزم الدوران أوتوماتيكيًا . وكما فى حالة التخمين غير الصحيح لاتجاهات القوى فإن التخمين غير الصحيح لاتجاه الدوران سوف يعطينا ببساطة إشارة معكوسة فى الإجابة .

سؤال : ما معادلة عزوم الدوران حول B ؟

الإجابة : $(4.8\text{ m})P - (1.8\text{ m})V - (600\text{ N})(0.60x - 1.8\text{m}) = 0$

سؤال : هل تغيرت معادلتا الشرط الأول ؟

الإجابة : لا يتأثر الشرط الأول باختيار المحور أو وضع القوى المؤثرة على الجسم .

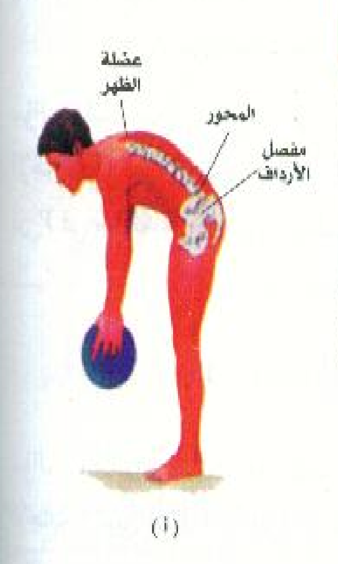
الحل والمناقشة : باستخدام نفس نتائج معادلات القوة التى حصلنا عليها فى المثال 8-4 نجد أن : $V = 800\text{ N}$ و $H = P$. لاحظ أن المعادلة الأخيرة عالية تتحول إلى :

$$(4.8\text{ m})H - (1.8\text{ m})(800\text{ N}) - (360\text{ N})x + 1080\text{ m.N} = 0$$

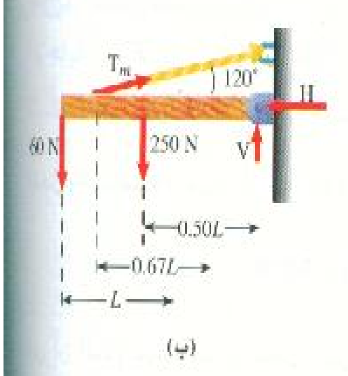
ومنه نجد أن :

$$(4.8\text{ m})H - (360\text{ N})x - 360\text{ m.N} = 0$$

وهذه هى نفس العلاقة بين H و x السابق الحصول عليها فى المثال 8-4 .



(أ)



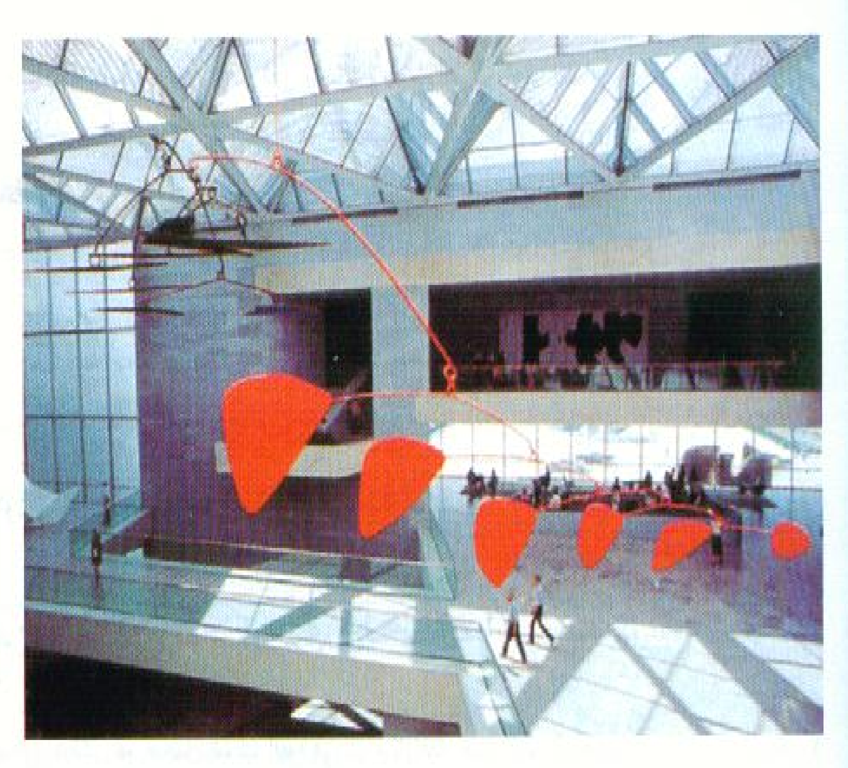
(ب)

شكل 16-4 :
يمكن إيجاد القوى الموجودة فى ظهر الرجل باستخدام النموذج المبين فى الجزء (ب) من الشكل .

7-4 إصابة الظهر من رفع الأثقال

ربما لفت بعضهم انتباهك إلى أن هناك طريقة صحيحة وأخرى خاطئة لرفع جسم ثقيل ؛ لنطبق ما تعلمته لنرى أن هذا صحيح ولماذا . اعتبر الموقف الفعلى الموضح بالشكل 16-4أ الذى يمثل رجلاً يرفع كرة بولينج وزنها 60 N . فى هذه الحالة من المحتمل أن يحدث إجهاد للظهر إذا كان الشد فى عضلة الظهر كبيرًا جدًا أو كان ضغط

العمود الفقرى على مفصل الأرداف كبيرًا جدًا ، ومن السهل حساب هذه القوى بتبسيط الموقف كما هو مبين بالجزء (ب) فى الشكل. فى هذا النموذج يستبدل العمود الفقرى بعمود أفقي مرتكز على الأرداف . لنفرض أن T_m هو الشد فى عضلة الظهر وأن مركبتى القوة المؤثرة على مفصل الأرداف هما H و V ، ولنعتبر أن وزن الجزء العلوى من جسم الرجل هو 250 N بأبعاده المبينة بالشكل .



لكى يستمر هذا « الموبايل » ساكنًا لا يكفى فقط أن يتحقق الشرط الأول للاتزان ، بل لابد أن يتحقق الشرط الثانى حول أى محور تختاره . وعلى وجه التحديد يجب أن تنطبق نقطة تعلق كل جزء فى « الموبايل » على مركز ثقل ذلك الجزء .

عندما يحمل الرجل الكرة فى حالة اتزان تصبح المعادلات التى تصف هذه الحالة على الصورة :

$$\Sigma F_x = 0 : \quad H - T_m \cos 12^\circ = 0$$

$$\Sigma F_y = 0 : \quad T_m \sin 12^\circ + V - 60^\circ - 250 = 0$$

$$\Sigma \tau = 0 : \quad (250)(0.50L) + (60)(L) - T_m \sin 12^\circ (0.67 L) = 0$$

حيث القوى جميعها مقدرة بالنيوتن . (تأكد من فهمك لطريقة الحصول على معادلة عزوم الدوران) . بقسمة طرفى المعادلة الأخيرة على L ثم حلها بالنسبة إلى T_m نجد أن $T_m = 1330$ N . وبالتعويض عن هذه القيمة فى المعادلتين الأخريين نحصل على $H = 1300$ N ، $V = 32$ N .

لاحظ أن هذه القوى كبيرة جدًا فبالرغم من أن كرة البولينج تزن 60 N فقط فإن الشد فى عضلة الظهر 1330 N كما أن القوة المؤثرة على العمود الفقرى فى حدود هذه القيمة . من الواضح إذن أنه عند انحنائك لرفع جسم ما فإنك تسبب إجهادًا شديدًا لظهرك . أما إذا رفعت الجسم وأنت فى وضع القرفصاء وجعلت ظهرك مستقيمًا فإن هذه القوى ستصبح أقل كثيرًا . هذا ويجب عليك إثبات ذلك بالاستعانة بالنموذج المبين بالشكل 16-4ب .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الاتزان الاستاتيكى ، (ب) ذراع الرافعة ، (جـ) عزم الدوران ، (جـ) مركز الثقل .

2 ـ إيجاد عزم الدوران الناتج عن قوة معينة بالنسبة إلى محور ثابت وتطبيق اصطلاح الإشارات على عزم الدوران .

3 ـ كتابة شرطى الاتزان الاستاتيكى بالكلمات وفى صورة معادلة .

4 ـ تحديد موضع مركز كتلة بعض الأجسام المنتظمة وتعيين مركز ثقل بعض الأجسام الأكثر تعقيدًا .

5 ـ وضع قوة الجاذبية المؤثرة على جسم فى المخطط البيانى للجسم الحر بالنسبة له .

6 ـ حل المسائل الاستاتيكية البسيط بتطبيق شرطى الاتزان .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

الاتزان الاستاتيكى :

الجسم الساكن والمستمر فى حالة السكون إلى الأبد يقال أنه فى حالة اتزان استاتيكى .

ذراع الرافعة :

ذراع الرافعة لقوة ما حول محور مختار هو المسافة العمودية من المحور إلى خط عمل القوة .

عزم الدوران (τ) :

عزم الدوران الناتج عن قوة معينة حول محور مختار هو حاصل ضرب القوة فى ذراع الرافعة حول ذلك المحور .

$$\tau = \text{القوة} \times \text{ذراع الرافعة}$$

وحدات عزم الدوران فى النظام SI هى m.N .

خلاصة :

يمكن تمييز تأثير عزم الدوران بأنه فى اتجاه دوران عقارب الساعة (cw) أو فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة (ccw) حسب ما إذا كان عزم الدوران يميل إلى تدوير الجسم فى ذلك الاتجاه أو فى الاتجاه المعاكس . ولأخذ هذين الاتجاهين المتعاكسين فى الاعتبار يستخدم اصطلاح الإشارات باعتبار عزوم الدوران فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة موجبة وعزوم الدوران فى اتجاه دوران عقارب الساعة سالبة . ويمكن التعرف على هذه التأثيرات بالاستعانة بالمخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالجسم .

مركز الثقل (c.g.) :

هى تلك النقطة التى يمكن اعتبار أن قوة الجاذبية مؤثرة فيها عند حساب عزم الدوران الذى تسببه حول المحور المختار .

خلاصة :

1 ـ يعنى هذا التعريف أنه يمكنك رسم وزن الجسم فى المخطط البيانى للجسم الحر باعتباره مؤثرًا عند مركز ثقل الجسم .

2 ـ يقع مركز الجسم المصنوع من مادة متجانسة والمتماثل الشكل فى مركزه الهندسى .

الشرط الأول للاتزان :

المجموع الاتجاهى لجميع القوى المؤثرة على جسم فى حالة اتزان يجب أن يساوى صفرًا : $\Sigma F = 0$ ، وهذا يعنى أن $\Sigma F_x = 0$ و $\Sigma F_y = 0$ و $\Sigma F_z = 0$.

الشرط الثاني للاتزان :

المجموع الجبرى لعزوم الدوران فى اتجاه دوران عقارب الساعة وفى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة يجب أن يساوى صفرا : $\Sigma \tau = 0$.

خلاصة :

1 ـ عند تطبيق الشرط الأول للاتزان لا يهم أين تؤثر القوى المؤثرة على الجسم ؛ المهم فقط هو اتجاه هذه القوى .

2 ـ عند تطبيق الشرط الثاني للاتزان من الضرورى أن نعلم أين تؤثر القوى على الجسم حتى يمكن حساب عزوم الدوران حول المحور المختار حسابًا صحيحًا .

3 ـ عند تطبيق الشرط الثاني للاتزان يمكن اختيار أى محور تحسب حوله عزوم الدوران حتى إذا كان هذا المحور خارج الجسم .

4 ـ حيث أن عزم الدوران يساوى صفرًا عندما يمر خط عمل القوة بالمحور فإنه من المناسب اختيار محور يمر به أكبر عدد ممكن من القوى .

أسئلة وتخمينات

1 ـ تسبب إشارة المرور المعلقة بسلك يمتد عبر الشارع ارتخاء السلك دائمًا . لماذا لا يحاول العمال إزالة هذا الارتخاء عند تعليق السلك ؟

2 ـ ارسم المخططات البيانية للجسم الحر الخاص بفتاة وزنها 300 N فى مواقف الاتزان الآتية : (أ) عندما تقف على قدم واحدة ، (ب) عندما تتعلق فى قضيب بيد واحدة ، (جـ) عندما تقف على رأسها ، (د) عندما تقف على يد واحدة فوق كرسى بدون مسند .

3 ـ ارجع إلى الشكل 4-9 . هل يزداد الشد فى السلك العلوى أم يقل كلما نقصت الزاوية التى يصنعها مع الرأسى ؟ ماذا ستكون قيمة الشد فى السلك عندما يصبح السلك رأسيًا ؟

4 ـ يوجد مركز ثقل القشرة الكروية المجوفة داخلها . اذكر بعض الأجسام التى يقع مركز ثقلها خارجها . أين يوجد بالتقريب مركز ثقل طبق العجين ؟ وشماعة الملابس ؟

5 ـ قيل لك أن أصحاب القوام النحيف أقل تعرضا لآلام الظهر من ذوى القوام الممتلئ . لماذا يجب أن يكون هذا صحيحًا ؟

6 ـ يشاهد طفل عرضًا وهو جالس على كتفى والده وقد أحاط رقبته برجليه . ناقش مختلف الطرق التى يمكن أن ينزل بها الوالد طفله على الأرض . أى هذه الطرق يمكن أن تؤدى إلى إصابة ظهر الرجل إصابة خطيرة ؟

7 ـ أسقطت ريح أفقية قوية شجرة على الأرض . لماذا يكون من الخطأ أن تقول أن الريح قد اقتلعت الشجرة من الأرض ؟ اشرح ما يحدث بالفعل .

8 ـ صبى واقف فى دلو نفايات كبير ، وكانت يد الدلو مربوطة فى حبل يمر على بكرة معلقة فى السقف شد الصبى الطرف الحر للحبل محاولاً رفع نفسه مع الدلو إلى أعلى . ماذا يحدث للشد فى الحبل والقوة التى يؤثر بها الصبى على قاع الدلو كلما زادت قوة شده للحبل ؟ هل يستطيع الصبى رفع نفسه مع الدلو عن الأرضية ؟

9 ـ حاولت امرأة فك صامولة تثبيت سلاح آلة لحش النجيلة فى حديقة باستعمال مفتاح لديها فلم تستطيع لأن قوتها كانت ضعيفة بالنسبة لهذا المفتاح . فكرت المرأة قليلاً ثم أتت بماسورة طولها 80 cm وأدخلتها فى يد المفتاح وكررت محاولة فك الصامولة فنجحت فى ذلك . اشرح السبب .

10 ـ يستغل عزم الدوران فى كل من الأدوات الآتية : قصافة الأسلاك ، عربة اليد ، المفتاح الإنجليزى ، فتاحة الزجاجات ، المطرقة المخلبية ، كسارة البندق . صف عزم الدوران الموجود فى كل حالة .

مسائل

القسمان 1-4 و 2-4

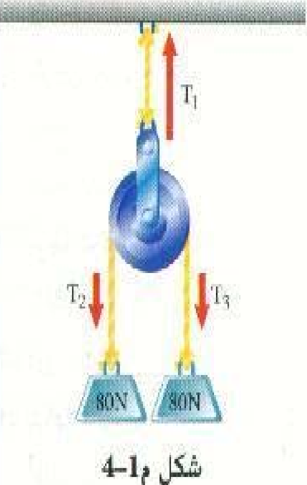
1 ـ ربط مكعب خشبى وزنه 25 N بحبل فى قاع مكعب آخر وزنه 35 N ، وعلق المكعب الأخير بحبل آخر فى السقف . أوجد الشد فى الحبلين العلوى والسفلى .

2 ـ قاموس وزنه 32 N موضوع على سطح منضدة وفوقه كتاب فيزياء وزنه 12.0 N والمجموعة فى حالة اتزان . أوجد (أ) قوة دفع المنضدة على القاموس ، (ب) قوة دفع القاموس على كتاب الفيزياء .

3 ـ ثلاثة حبال تشد جسمًا ، وكانت قوة الشد فى حبلين منها فى المستوى xy الأولى مقدارها 240 N بزاوية $30°$ والثانية بزاوية $120°$. (تقاس الزوايا فى المستوى xy بالطريق المعتادة) . أوجد قوة الشد **F** فى الحبل الثالث إذا كان الجسم فى حالة اتزان .

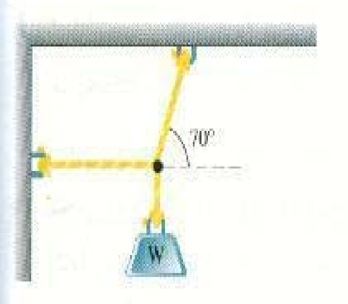
4 ـ يقع جسم تحت تأثير ثلاث قوى تقع كلها فى المستوى xy : الأولى مقدارها 180 N بزاوية قدرها $105°$ ، والثانية 75 N بزاوية قدرها $240°$ والثالثة **F** . أوجد **F** إذا كان الجسم فى حالة اتزان .

5 ـ نرى فى الشكل م4-1 جسمين وزن كل منهما 90 N معلقين فى طرفى حبل يمر على بكرة لا احتكاكية معلقة فى السقف . ما قيمة الشد فى الحبال الثلاثة (أ) إذا كان وزن البكرة مهملاً ؟ (ب) إذا كان وزن البكرة 25 N ؟

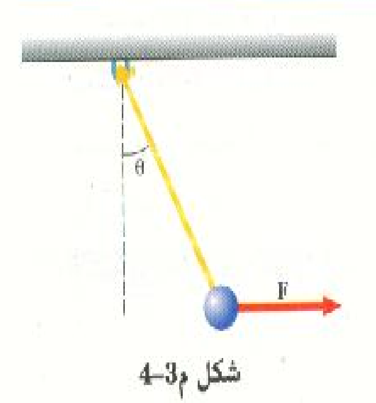


شكل م4-1

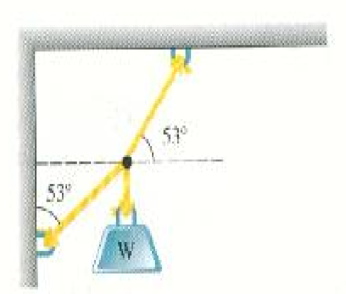
6 ـ الوزن W فى الشكل م4-2 يساوى 1600 N . ما قيمة الشد فى (أ) الجزء الأفقى من الحبل ؟ (ب) الحبل المتصل بالسقف ؟



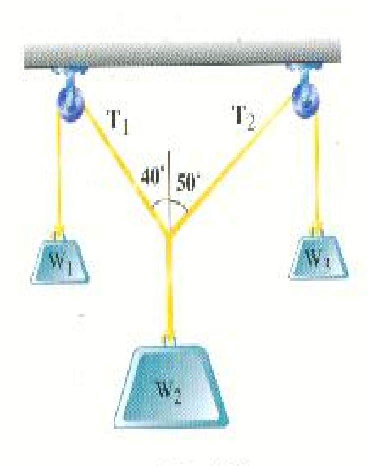
شكل م4-2



شكل م3-4



شكل م4-4

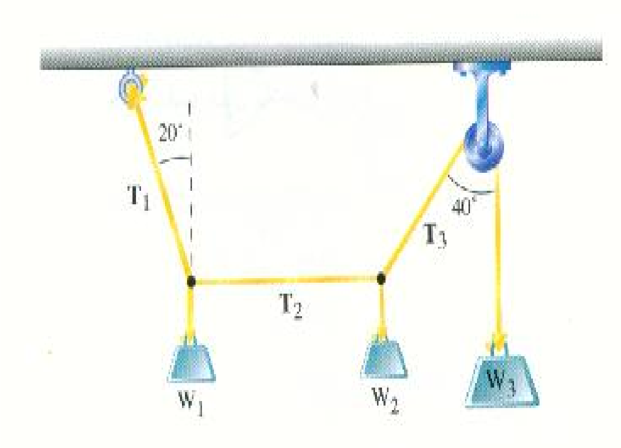


شكل م5-4

- 7 ـ إذا كـان الشـد فـي الحبل الأفقي بالشكل م3-4 يساوي 390 N . فما وزن الجسم ؟
- 8 ـ وجد أن النظام المبين بالشكل م3-4 يكون متزنًا عندما $\theta = 30^\circ$ إذا كانت القوة الأفقية $F = 240\ N$. ما وزن الجسم المعلق في طرف الحبل ؟
- 9 ـ إذا كان وزن الجسم الموضح بالشكل م3-4 يساوي 575 N . فما قيمة θ اللازمة لكي يتزن النظام عندما تكون $F = 310\ N$ ؟
- 10 ـ ما قيمة الشد في المسألة السابقة ؟

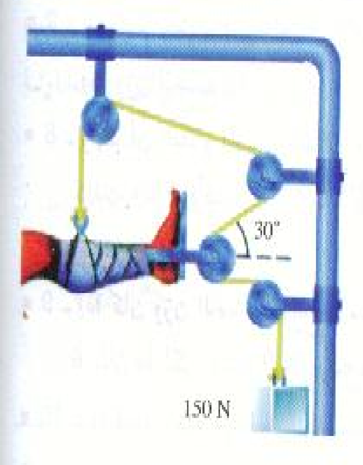
11 ـ يمسك طفل مزلجة وزنـها 100 N فـي حالة السـكون علـى تـل لا احتكاكي مغطى بالجليد وزاوية ميله 30° باستعمال حبل يمتد موازيًا للتل . أوجد القوة التي يلزم أن يؤثر بـها الطفـل علـى الحبـل حتـى تظل المزلجة في حالة اتزان .

- 12 ـ الشد في الحبل المتصل بالحائط الرأسي في الشكـل م4-4 يساوي 72 N . أوجد (أ) الشـد فـي الحبـل المتصـل بالسـقف . (ب) فـي الحبل المتصل بالوزن W .
- 13 ـ إذا كان $W = 300\ N$ في المسألة السابقة ، أوجد الشد في كل من الحبلين .
- 14 ـ الأوزان الثلاثة W_1 ، W_2 ، W_3 في الشكل م5-4 فـي حالـة اتـزان ، والبكرتان المستعملتان لا احتكاكيتان بحيث لا تؤثران على الشد في كل من الحبلين فإذا كان $W_1 = 720\ N$ ، أوجد W_2 و W_3 .
- 15 ـ إذا كان $W_2 = 200\ N$ في المسألة السابقة (شكـل م5-4) ، مـا قيمـة كل من الوزنين W_1 و W_3 حتى تظل المجموعة في حالة اتزان ؟
- 16 ـ $W_2 = 600\ N$ في موقف الاتزان المبين بالشكل م6-4 والبكرتان لا احتكاكيتان بحيث لا تؤثران على الشد في الحبلين . أوجد الوزنـين W_1 و W_3 والشدين T_1 و T_2 في الحبلين .



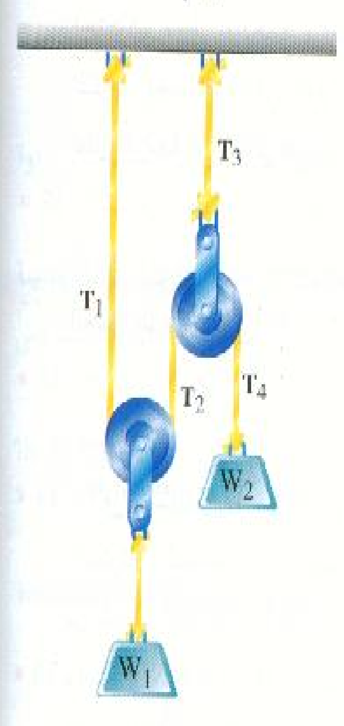
شكل م6-4

- 17 ـ الشد في الحبل $T_1 = 1200\ N$ في موقف الاتزان المبين بالشكل م6-4 . أوجد الأوزان W_3 ؛ W_2 ، W_1 .




شكل م4-7

■ 18 ـ كسرت ساق عداءة ووضعت فى الجبس وعلقت كما هو مبين بالشكل م4-7 . افترض أن البكرات لا احتكاكية وأن الشد متساوى فى جميع أجزاء الحبل ويساوى بالتحديد 150 N . ما مقدار القوى الأفقية المؤثرة على الرجل ؟ ما مقدار القوة المؤثرة رأسيا إلى أعلى على القدم والرجل معًا ؟



شكل م4-8

■ 19 ـ البكرتان فى الشكل م4-8 لا احتكاكيتان ومهملتا الوزن ، وكان $W_1 = 600$ N عند الاتزان . أوجد الوزن W_2 وقيم الشد T_1 ، T_2 ، T_3 ، T_4 .

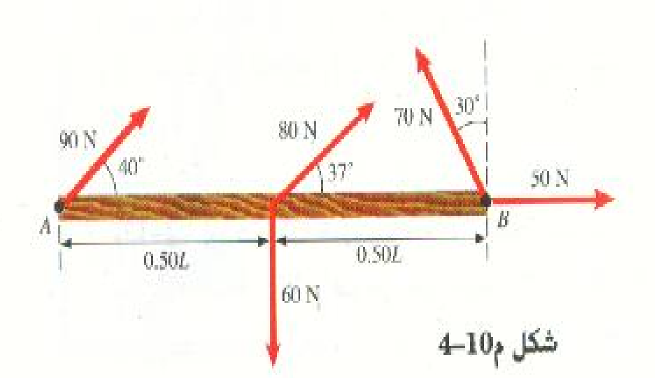

شكل م4-9

■ 20 ـ البكرتان فى الشكل م4-9 لا احتكاكيتان ومهملتا الوزن . بأى قوة يجب أن يشد رجل وزنه 540 N الحبل إلى أسفل لكى يحمل نفسه دون تلامس مع الأرضية ؟

القسم 3-4

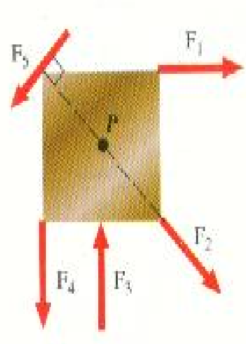
21 - أوجد عزوم الدوران للقوى المبينة بالشكل م10-4 حول محور يمر بالنقطة A إذا كان طول القضيب $L = 5.0$ m .

22 - أوجد عزوم الدوران للقوى المبينة بالشكل م10-4 حول محور يمر بالنقطة B إذا كان طول القضيب $L = 8.0$ m .



شكل م10-4

23 - مربع طول ضلعه 4 m تؤثر عليه خمس قوى كما هو مبين بالشكل م11-4 . ما قيمة (أ) ذراع الرافعة لكل من القوى المؤثرة على المربع ؟ (ب) عزم دوران كل من هذه القوى حول محور يمر بالنقطة P ؟



شكل م11-4

24 - بدّال دراجة طول ساعده 16 cm . إذا وضعت فتاة وزنها 360 N كل ثقلها على أحد الساعدين ، فما مقدار عزم الدوران الناتج ؟ (أ) عندما يكون الساعد أفقيًا ؟ عندما يصنع الساعد زاوية قدرها 30° بالنسبة للرأسى ؟

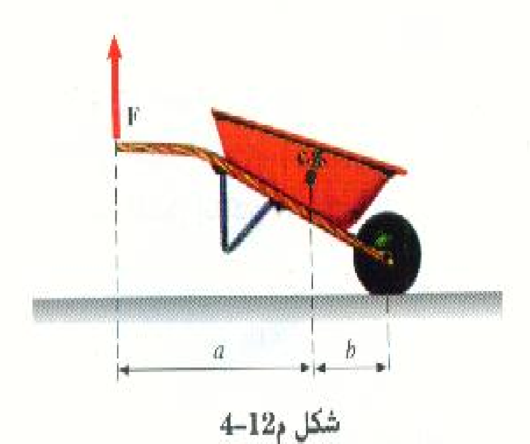
25 - تحتاج المسامير المحواة (القلاووظ) فى محرك دراجة نارية (موتوسيكل) عزم دوران قدره 80 N.m لربطها . ما القوة التى يجب أن يؤثر بها ميكانيكى على مفتاح مسامير محواه طوله 20 cm حتى يمكنه فك المسمار ؟

26 - يقف غطاس وزنه 500 N فى نهاية لوح قفز طوله 4 m . ما عزم الدوران الناتج عن وزن الغطاس حول محور يمر بنقطة منتصف لوح القفز ؟

27 - ساعة كبيرة يحتك طرف عقرب دقائقها بالسطح الداخلى لغطائها الزجاجى . فإذا كان قوة الاحتكاك بين طرف العقرب والغطاء الزجاجى 0.04 N وطول العقرب 5 cm ، فما أقل قيمة لعزم الدوران يجب تسليطها على عقرب الدقائق حتى لا تتوقف الساعة ؟

القسمان 4-4 و 5-4

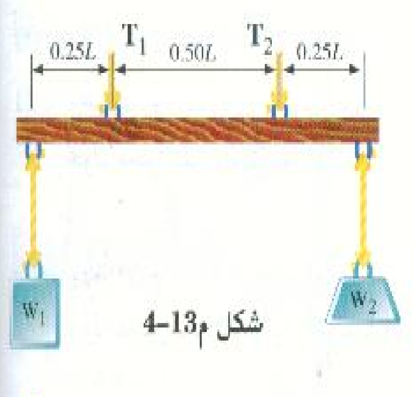
28 - كرتان وزنهما 200 N و 240 N على الترتيب مثبتتان فى طرفى قضيب صلب مهمل الوزن طوله 1.2 m . فى أى نقطة يوضع القضيب على حافة حادة بحيث يتخذ وضعًا أفقيًا ؟



شكل م12-4

29 - ما مقدار القوة **F** التى يجب أن تؤثر على يدى عربة اليد المبينة بالشكل م12-4 رأسيًا إلى أعلى حتى يمكن رفع حمل وزنه 600 N فى مركز الثقل الموضح ؟ اعتبر أن $a = 0.8$ m ، $b = 0.2$ m .

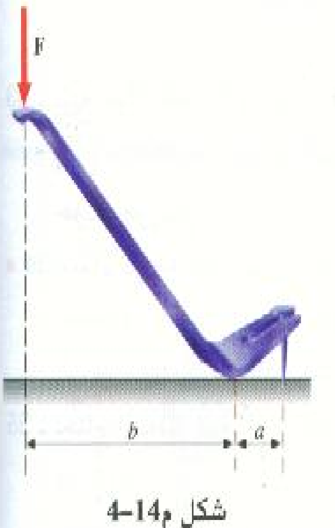
30 - طفلان يلعبان على أرجوحة الاتزان ، أحدهما وزنه 400 N ويجلس على بعد 1.2 m من المركز . أين يجلس طفل آخر على الجانب الآخر إذا كان وزنه 480 N بحيث تظل الأرجوحة أفقية ؟



شكل م13-4

▪ 31 - يمثل الشكل م13-4 لوحًا خشبيًا عديم الوزن معلقًا بحبلين رأسيين الشد فيهما T_1 ، T_2 ويحمل في طرفيه ثقلين وزنهما W_1 ، W_2 . إذا كان $T_1 = 240\ N$ ، $W_2 = 280\ N$ ، أوجد قيمة كل من W_1 ، T_2 .

▪ 32 - لوح خشبي منتظم وزنه 200 N يحمله حبلان كما بالشكل م13-4 . إذا كان كل حبل يستطيع أن يتحمل شدًا قدره 900 N وكان W_2 ضعف W_1 ، فما هي أكبر قيمة للوزن W_1 ؟ افترض أن الحبلين اللذين يحملان الثقلين قويين بدرجة كافية لأن لا ينقطعا .



شكل م14-4

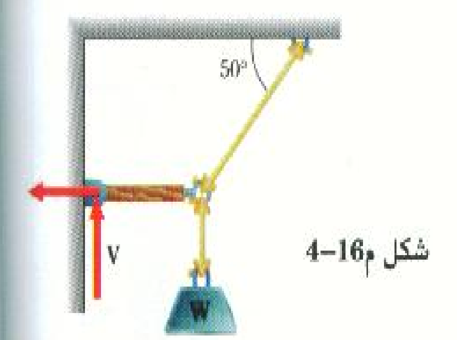
33 - إذا كانت القوة المؤثرة على يد كلابة المسامير المبينة بالشكل م14-4 تساوى 240 N ، فما قيمة القوة المؤثرة على المسمار ؟ افترض أن القوة المؤثرة على المسمار رأسية وأن $a = 0.3\ cm$ و $b = 5\ cm$.

▪ 34 - لتعيين مركز ثقل شخص ما وضع هذا الشخص على ميزانين كما هو موضح بالشكل م15-4 فوجد أن قراءة الميزانين الأيسر والأيمن 260 N و 200 N على الترتيب . افترض أن قراءتي الميزانين مصححتان بطرح قراءتيهما في عدم وجود الشخص في مكانه الموضح . أوجد موضع مركز الثقل x إذا كان الطول L يساوى 2 m .



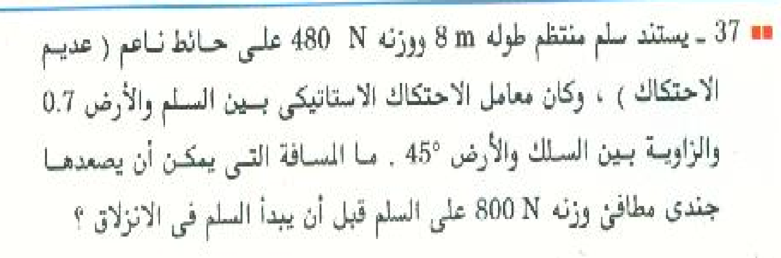
شكل م15-4

▪ 35 - وزن العمود المنتظم بالشكل م16-4 يساوى 280 N . أوجد (أ) الشد في الحبل العلوى . (ب) المركبتان الأفقية H والرأسية V للقوة التى يؤثر بها المسمار إذا كان $W = 840\ N$.

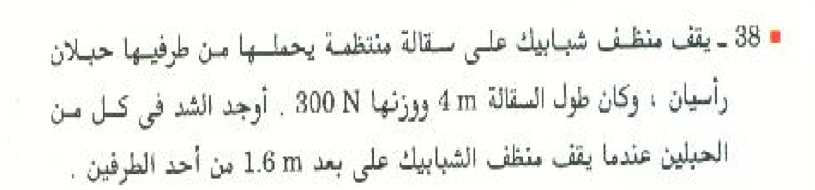


شكل م16-4

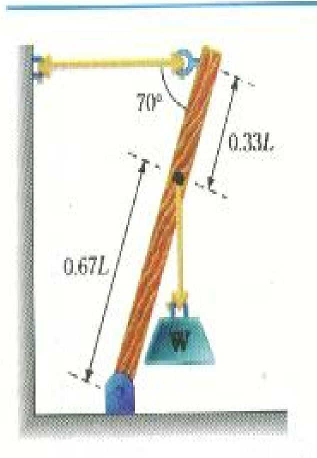
▪ 36 - يحمل عمود منتظم وزنه 540 N ثقلاً كما هو مبين بالشكل م17-4 . (أ) ما أكبر وزن يمكن حمله بهذا الشكل إذا كان الحبل الأفقي يمكن أن يتحمل شدًا قدره 2800 N على الأكثر ؟ ما مقدار المركبتين الأفقية والرأسية للقوة المؤثرة على قاعدة العمود في هذه الحالة ؟



37 - يستند سلم منتظم طوله 8 m ووزنه 480 N على حائط ناعم (عديم الاحتكاك) ، وكان معامل الاحتكاك الاستاتيكى بين السلم والأرض 0.7 والزاوية بين السلك والأرض 45° . ما المسافة التى يمكن أن يصعدها جندى مطافئ وزنه 800 N على السلم قبل أن يبدأ السلم فى الانزلاق ؟

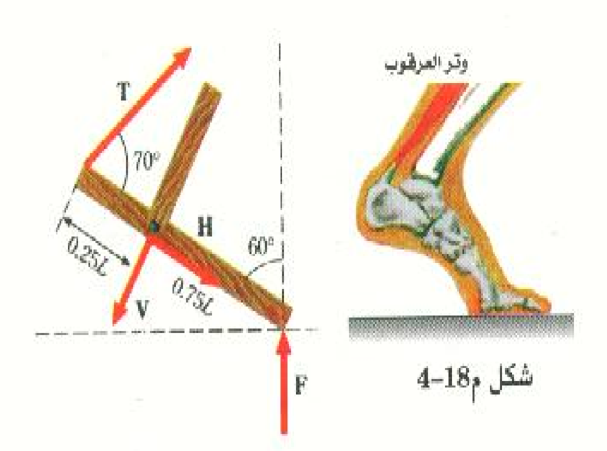


38 - يقف منظف شبابيك على سقالة منتظمة يحملها من طرفيها حبلان رأسيان ، وكان طول السقالة 4 m ووزنها 300 N . أوجد الشد فى كل من الحبلين عندما يقف منظف الشبابيك على بعد 1.6 m من أحد الطرفين .



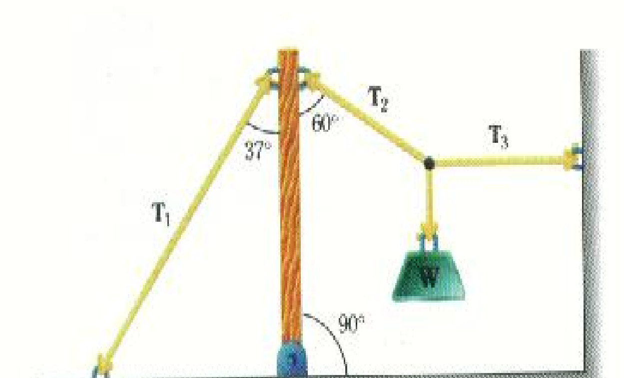
شكل م4-17

39 - عندما يقف شخص على أطراف أصابع رجليه يكون الموقف مشابها إلى درجة كبيرة لما هو مبين بالشكل م4-18 . وعندما يقف الشخص على قدم واحدة يكون مقدار دفع الأرضية F مساويًا لوزن هذا الشخص . فإذا كان وزن الشخص 720 N ، أوجد (أ) الشد فى وتر العرقوب ، (ب) المركبتان H و V عند الكاحل .



شكل م4-18

40 - فى الشكل م4-19 وزن العمود 960 N والشد فى الحبل الأفقى $T_3 = 840\ N$. أوجد W ، T_2 ، T_1 وقوة دفع العمود لسمار لا احتكاكى فى قاعدته إلى أسفل .

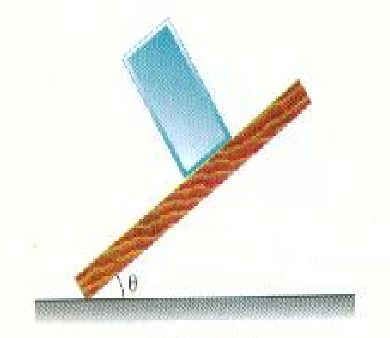




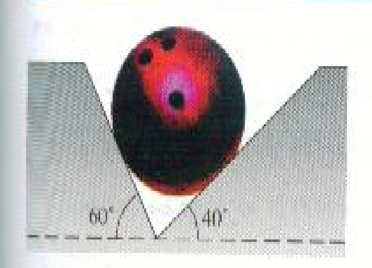
شكل م4-19

القسمان 4-6 و 4-7

41 - القالب المنتظم المبين بالشكل م4-20 طوله يساوى 2.5 مرة قدر عرضه ، والاحتكاك يمنع القالب من الانزلاق . فإذا زيدت الزاوية θ ببطء ، فعند أى ميل ينقلب القالب ؟

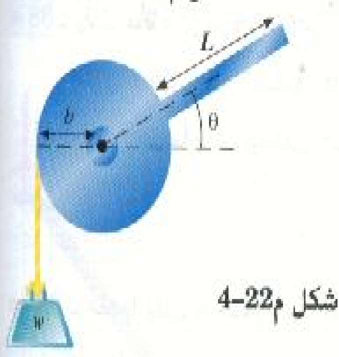


شكل م4-20



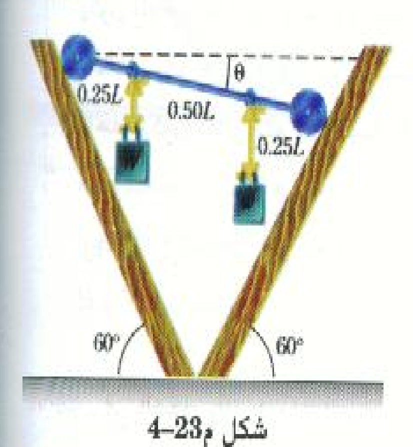
شكل م21-4

42 ـ الشكل م21-4 يمثل كرة بولينج وزنها 80 N مستقرة فى حالة اتزان فى مجرى ذى حائطين لا احتكاكيين . ما مقدار القوة التى يؤثر بها كل من الحائطين على الكرة ؟ اعتبر الكرة منتظمة متجانسة .



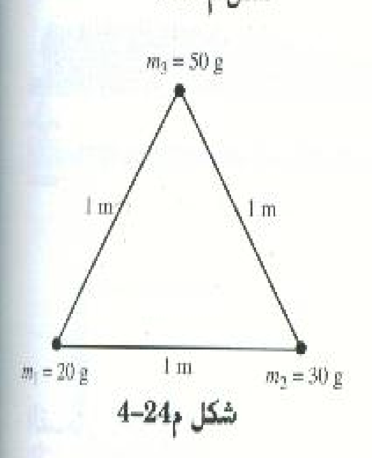
شكل م22-4

43 ـ يمثل الشكل م22-4 قضيبًا طوله L ووزنه W ملتحمًا بعجلة نصف قطرها b ويمكنها أن تدور دورانًا حرًا حول المحور . ما قيمة وزن جسم W معلق على حافة العجلة يضمن أن يكون النظام متزنًا فى الوضع المبين بالشكل ؟



شكل م23-4

44 ـ قضيب صلب منتظم طوله L ومهمل الوزن يحمل عند طرفيه عجلتين صغيرتين لا احتكاكيتين يمكنهما التدحرج على الضلعين المائلين لمثلث متساوى الأضلاع كما هو مبين بالشكل م23-4 . علق وزنان w و W فى القضيب بحيث يبعد كل منهما عن أحد طرفى القضيب مسافة قدرها $0.25\,L$ ؛ فاتزن القضيب فى وضع يصنع زاوية قدرها $\theta = 12°$ مع الأفقى . أوجد النسبة W/w .

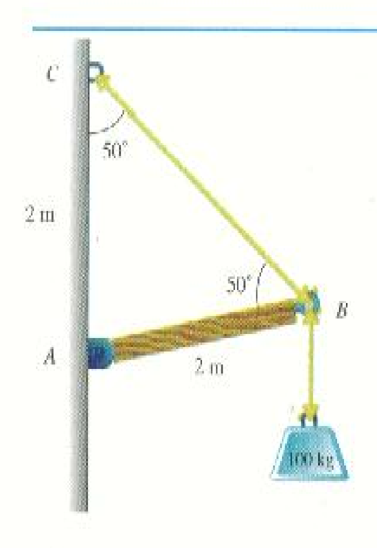


شكل م24-4

45 ـ رتبت ثلاث كتل على شكل مثلث متساوى الأضلاع باستخدام ثلاثة قضبان دقيقة مهملة الوزن كما هو مبين بالشكل م24-4 . فإذا علق هذا النظام المتماسك فى خيط متصل بالكتلة m_3 ، فما هى الزاوية التى يصنعها الضلع الواصل بين الكتلتين m_3 و m_2 بالنسبة للرأسى ؟

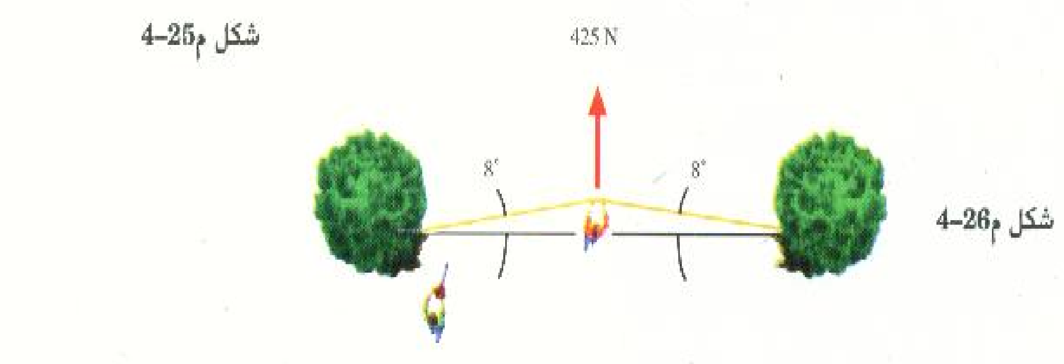
مسائل عامة

46 ـ يتكون المرفاع (الونش) الموضح بالشكل م25-4 من عمود منتظم طوله 2 m وكتلته 20 kg يمكن أن يدور حول محور ثابت يمر بالنقطة A ، وهناك سلك يتصل أحد طرفيه بالنهاية الأخرى لعمود B ويتصل طرفه الآخر بالنقطة C التى تقع فوق A مباشرة وتبعد عنها مسافة قدرها 2 m . فإذا كان المرفاع متزنا فى الوضع المبين بالشكل عندما كان يحمل ثقلاً معلقًا من النقطة B كتلته 100 kg ، أوجد (أ) القوتين الأفقية والرأسية المؤثرتين على العمود عند النقطة A ؛ (ب) الشد فى السلك BC .



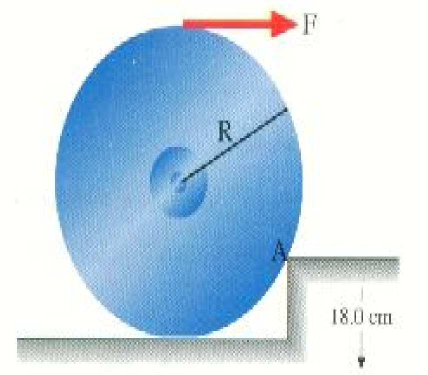
شكل م25–4

47 ـ تريد أنت وصديقك قطع شجرة بالمنشار بحيث لا تقع الشجرة ناحية منزلك . وأنت تعلم أن بإمكانك بذل قوة قدرها 425 N فقط ، وهذه القوة قد لا تكون كافية لمنع الشجرة من الوقوع على المنزل . ولكونك طالب فيزياء تفهم مركبات القوة فقد قمت بربط أحد طرفى الحبل فى الشجرة المراد قطعها وربط الطرف الآخر فى شجرة ثانية تقع فى الاتجاه البعيد عن المنزل . وبعد ذلك قمت بدفع الحبل جانبًا من منتصفه بقوة قدرها 425 N ، كما هو مبين بالشكل م26–4 . بهذه الطريقة اتخذ الحبل وضعًا يصنع نصفاه زاوية قدرها 8.0° بالنسبة إلى الخط المستقيم الواصل بين الشجرتين . ما مقدار القوة التى تستطيع أن تؤثر بها على الشجرة فى الاتجاه البعيد عن المنزل نتيجة لعبقريتك هذه ؟



شكل م26–4

48 ـ لنفرض أنك تدحرج برميلاً على أرض مستوية فوصلت إلى عتبة ارتفاعها 18.0 cm كما هو مبين بالشكل م27–4 . ولكى يصعد البرميل هذه العتبة كان عليك أن تؤثر بقوة أفقية **F** على قمة البرميل كما هو موضح بالشكل . فإذا كان نصف قطر البرميل 52.5 cm ووزنه 1230 N ، فما أقل قيمة للقوة **F** يمكنها أن ترفع البرميل على العتبة ؟



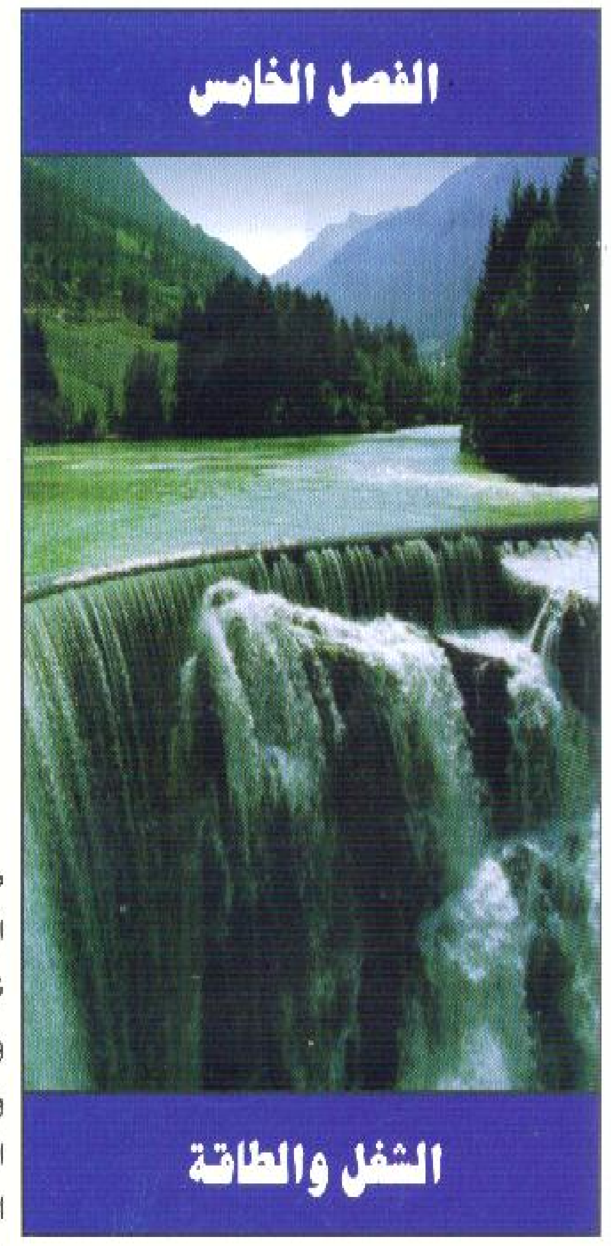
شكل م27–4

49 ـ لوح منتظم كتلته 13.6 kg وطوله 4.4 m مستقر على منصة بحيث يبرز منه فى الهواء طول قدره 1.4 m . بدأ كلب كتلته 9.6 kg السير على اللوح تجاه الطرف المعلق فى الهواء . إلى أى مسافة من حافة المنصة يستطيع الكلب الوصول قبل أن يبدأ اللوح فى الانقلاب ؟

50 ـ أثناء تحريك صندوق ثقيل صعودًا على درجات سلم كنت أنت وصديقك تمسكان طرفين متقابلين من الصندوق وتبذلان قوتين رأسيتين على القاع . ثم أخبرت صديقك أنك ستسبق إلى أعلى على السلم عندما كان قاع الصندوق يصنع زاوية قدرها 37° فوق الأفقى ، ويوضح الشكل م28–4 القوتين المؤثرتين على الصندوق فى تلك اللحظة . افترض أن الصندوق منتظم وأن كتلته M وطوله L وارتفاعه $h = 0.4\ L$. أيكما يدفع بقوة أكبر من الآخر .

h
L
c.m.
F_1
37°
F_2

شكل م28–4



من ناحية المبدأ ، يمكن وصف جميع أنواع الحركة بدلالة القوى المسببة لها . ولكن مفهومى الشغل والطاقة ، اللذين نقدمهما فى هذا الفصل ، يمكنهما فى كثير من الأحيان تبسيط وصف الحركة تبسيطاً كبيرًا . أحد أسباب ذلك أن الشغل والطاقة كميتان **قياسيتان (غير متجهتين)** ، ولهذا فإن التعامل معهما رياضيًا أسهل كثيرًا من التعامل مع **متجهات القوى .** الأهم من ذلك أننا سنرى أن للطاقة أشكالاً عديدة وأنها توجد فى كل فروع الفيزياء .

يعتبر مبدأ بقاء الطاقة فى كل العمليات الفيزيائية واحدًا من أهم مفاهيم التوحيد فى الفيزياء وأكثرها أساسية . ولكى يمكننا فهم هذا المبدأ علينا أن نتناول فى البداية تعريف كل من الشغل والطاقة .

5-1 تعريف الشغل

عندما تجلس إلى مكتبك لدراسة هذا الكتاب فإنك لا تبذل شغلاً . هذا لا يعنى أنك كسول أو أن تعلم الفيزياء عملية لا تحتاج إلى مجهود ، فهى فقط تقرر حقيقة ناشئة من تعريف الشغل كما يستخدمه العلماء .

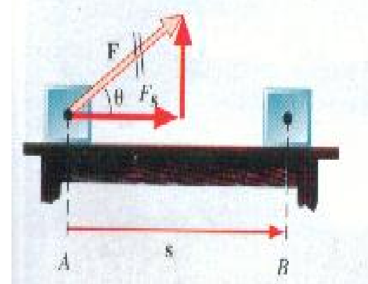
يعرف العلماء الشغل المبذول بواسطة قوة ما بالطريقة الآتية . لنفرض أن القوة **F** تشد جسمًا من A إلى B خلال إزاحة قدرها **s** كما هو مبين بالشكل 1-5 . سوف نرمز لمركبة **F** فى اتجاه **s** بالرمز F_s .

ويعرف الشغل المبذول بواسطة **F** خلال الإزاحة s بالعلاقة :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة } \mathbf{F} = F_s\, s \qquad (أ5-1)$$

ونكرر مرة أخرى أن الشغل كمية غير متجهة لا يرتبط بها أي اتجاه .

في النظام SI تقاس القوة بالنيوتن والمسافة بالمتر ، وعليه فإن وحدة الشغل هي نيوتن ـ متر (N-m) ، وقد أعطيت هذه الوحدة اسمًا خاصًا هو الجول (J) .



شكل 1-5 :
الشغل المبذول بواسطة **F** في إزاحة الجسم من **A** إلى **B** هو
$F_s\, s = (F \cos\theta) s$

الجول هو الشغل المبذول بواسطة قوة قدرها نيوتن واحد عند تأثيرها خلال مسافة قدرها متر واحد على استقامة خط عمل القوة : 1 J = 1 N.m .

أحيانًا تستخدم وحدات أخرى لقياس الشغل مثل القدم ـ باوند (ft - lb) والإرج والإلكترون فولط (eV) ، حيث :

$$1 \text{ ft . lb} = 1.356 \text{ J}$$

$$1 \text{ erg} = 1 \times 10^{-7} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

والكميات المقاسة بهذه الوحدات الأخرى يجب دائمًا تحويلها إلى الجول قبل استخدامها في نظام الوحدات SI .

ويمكن كتابة معادلة تعريف الشغل في صورة مختلفة عن المعادلة (أ5-1) إذا لاحظنا من الشكل 1-5 أن :

$$F_s = F \cos\theta$$

حيث θ هي الزاوية بين **F** و **s** . بالتعويض عن F_s بهذه القيمة في المعادلة (أ5-1) نحصل على :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة } \mathbf{F} = F_s \cos\theta \qquad (ب5-1)$$

باختصار :

الشغل W المبذول بواسطة قوة **F** مؤثرة على جسم خلال إزاحة **s** هو $F_s\, s$ أو $F_s \cos\theta$.

F_s في هذين التعبيرين المتكافئين هي مركبة **F** في اتجاه الإزاحة **s** والزاوية θ هي الزاوية بين **F** و **s** .

لاحظ أن وجود $\cos\theta$ في المعادلة (ب5-1) يعني ضمنيًا أن الشغل قد يكون موجبًا أو سالبًا . وهو يكون موجبًا عندما $0° < \theta < 90°$ (**F** لها مركبة في اتجاه الإزاحة) وسالبًا عندما $90° < \theta < 180°$ (**F** لها مركبة في عكس اتجاه الإزاحة) . هذا التعريف للشغل ينطبق على جميع القوى المؤثرة في موقف معين كل على حدة . أي أن الشغل المبذول بواسطة كل قوة يمكن حسابه بتطبيق المعادلة (1-5) .



شكل 2–5 :
F لا تبذل شغلاً على الدلو لأن F ليس لها مركبة فى اتجاه الإزاحة .

مثال توضيحى 1-5 :

الشكل 2–5 يمثل شخصًا يؤثر بقوة رأسية **F** على دلو أثناء حمله مسافة أفقية قدرها 8.0 m بسرعة مقدارها ثابت . ما قيمة الشغل الذى تبذله **F** ؟

استدلال منطقى :

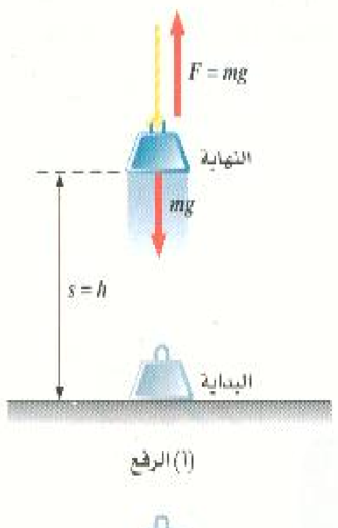
تعريف الشغل هو $W = F_s \cos\theta$. القوة **F** فى الشكل 2–5 رأسية والإزاحة **s** أفقية . إذن $\theta = 90°$ ، وبالتالى :

$$W = Fs\cos 90° = 0$$

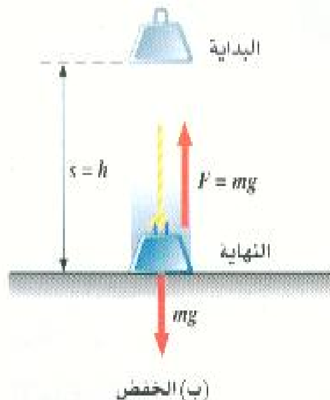
أى أن القوة الرأسية لا تبذل شغلاً لأنها ليست لها مركبة فى اتجاه الحركة . لاحظ أيضًا أن بدء الحركة الأفقية يتطلب مركبة أفقية لحظية للقوة ، ولكن الاحتفاظ بالسرعة الأفقية ثابتة لا يحتاج إلى أية قوة .

مثال توضيحى 2-5 :

ما مقدار الشغل الذى تبذله على جسم وزنه mg (أ) عند رفعه رأسيًا إلى أعلى مسافة قدرها h بسرعة ثابتة ؟ (ب) عند خفضه لنفس المسافة بسرعة ثابتة أيضًا ؟



(أ) الرفع



(ب) الخفض

شكل 3–5 :
الشغل المبذول بواسطة القوة الرافعة F يساوى mgh فى (أ) ويساوى $-mgh$ فى (ب) .

استدلال منطقى :

(أ) موقف الرفع مبين بالشكل 3–5أ . لكى ترفع الجسم يجب أن تجذبه رأسيًا إلى أعلى بقوة تساوى وزنه mg * . وبما أن الإزاحة h فى الاتجاه الرأسى إلى أعلى كما أن القوة الرافعة فى نفس الاتجاه ، إذن ، من تعريف الشغل :

$$W = Fs\cos 0° = (mg)\,(h)(1) = mgh$$

هذا هو الشغل الذى تبذله أثناء رفع الجسم مسافة قدرها h .

(ب) يوضح الشكل 2–5ب ما يحدث عندما نخفض الجسم . الآن **F** و **s** فى اتجاهين متضادين . إذن ، $F = mg$ و $\theta = 180°$. عندئذ سنجد من العلاقة $W = Fs\cos\theta$ أن :

$$W = (mg)\,(h)\,(\cos 180°) = mgh(-1) = -mgh$$

أى أن الشغل الذى تبذله سالب فى هذه الحالة لأن القوة التى تسلطها على الجسم **F** فى اتجاه مضاد للإزاحة **s** . ويمكن النظر بطريقة أخرى إلى بذل الشغل السالب بأن نعتبر أن الشغل مبذول **عليك** وليس بواسطتك ، فالجاذبية هى التى تبذل شغلاً موجبًا

* يحتاج الجسم قوة أكبر قليلاً من mg حتى يكتسب عجلة ابتدائية فى الاتجاه الرأسى إلى أعلى ، ولكن إن يبدأ الجسم حركته فإن القوة mg إلى أعلى سوف تتزن مع قوة الجاذبية ويستمر الجسم فى الحركة بسرعة ثابتة .

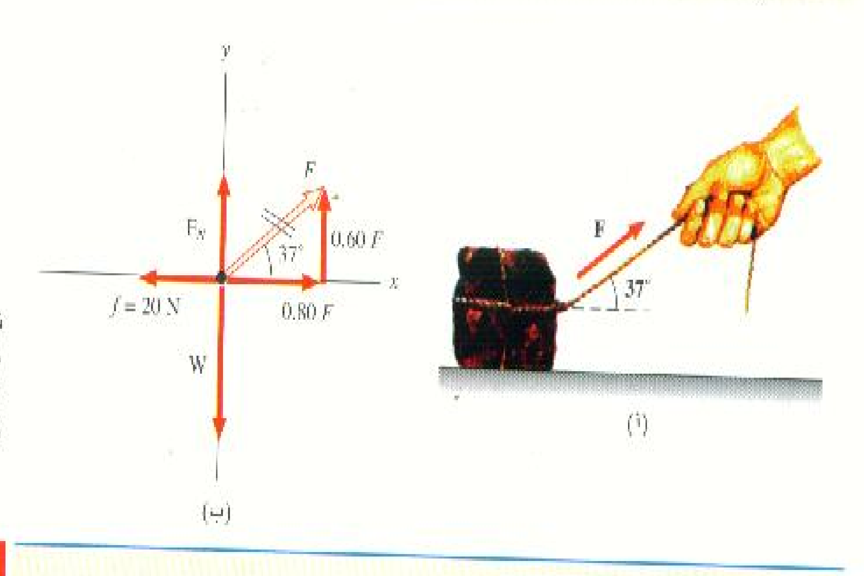
على الجسم فى هذه الحالة . بالمثل ، يمكن القول فى الجزء (أ) أن قوة الجاذبية تبذل شغلاً سالبًا على الدلو أثناء رفعك له .

تمرين : ما مقدار الشغل المبذول بواسطة قوة الجاذبية على الجسم فى المثال التوضيحى 5–2 (أ) عند رفعه إلى أعلى ؟ (ب) عند خفضه إلى أسفل ؟

الإجابة : (أ) $-mgh$ ، (ب) mgh .

مثال 5-1

يقوم شخص بشد صندوق على الأرضية بسرعة ثابتة باستخدام قوة قدرها **F** كما هو مبين بالشكل 5–4 . لنعتبر أن قوة الاحتكاك المضادة للحركة 20 N وأن كتلة الصندوق 30 kg . أوجد مقدار **F** وكمية الشغل المبذول على الصندوق بواسطة **F** عندما يتحرك الصندوق مسافة قدرها 5.0 m .



شكل 5–4 : المركبة الأفقية للقوة تبذل بالفعل شغلاً على الصندوق . بيد أن الشغل المبذول بواسطة المركبة الرأسية يساوى صفرًا .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يجب معرفته ليمكن حساب الشغل ؟

الإجابة : قوة الشد ، أو على الأقل مركبتها فى اتجاه الإزاحة ، والزاوية بين **s** و **F** .

سؤال : الإزاحة والزاوية معلومتان ، ولكن قوة الشد **F** مجهولة . ما المفتاح الذى يشير إلى **F** فى نص المسألة ؟

الإجابة : **F** يجب ان تحقق شرط ثبات السرعة على الأرضية ، وهذا يعنى أن $\Sigma F_x = 0$ أو $F_x = f = 20$ N فى الاتجاه المضاد للقوة **f** .

سؤال : ما هى معادلة الشغل المبذول بواسطة القوة **F** فى هذه الحالة ؟

الإجابة : $W = F_x x$.

سؤال : هل تلعب كتلة الصندوق أى دور ؟

الإجابة : لا . الكتلة تلعب دورًا فى تعيين الوزن وقوة الاحتكاك ، ولكن الوزن عمودى

على الإزاحة في هذه الحالة ، ولهذا فهو لا يبذل شغلاً على الصندوق . أى أن f معطاة بشكل مباشر . وعادة ما تكون معطيات المسألة أكثر مما نحتاج إليه فى الحل ، والحقيقة أن التعرف على المعلومات المتعلقة بالموقف جزءاً من الحل .

سؤال : ما هي العلاقة بين F_x و F ؟

الإجابة : $F_x = F \cos 37°$

الحل والمناقشة : مقدار القوة المسلطة هو :

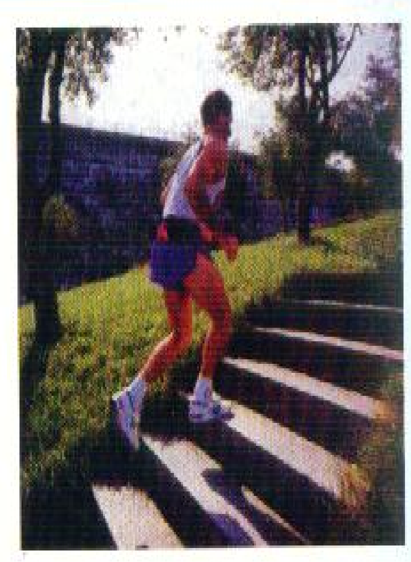
$$F = \frac{F_x}{\cos 37^{\circ}} = \frac{20\ \text{N}}{0.80} = 25\ \text{N}$$

والشغل المبذول بواسطة **F** هو :

$$W = F_x x = (20\ \text{N})(5.0\ \text{m}) = 100\ \text{J}$$

تذكر أن المركبة العمودية للقوة **F** ، طبقاً للتعريف لا تبذل شغلاً على الصندوق طالما كانت حركة الصندوق أفقية خالصة .

تمرين : احسب الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك . **الإجابة** : $-100\ \text{J}$.



(أ)



(ب)

من الذى يستهلك قدرة أكبر : العداء فى (أ) أم الرجل الذى يصعد السلم فى (ب) ؟

5-2 القدرة

عند شرائك لسيارة قد يهمك أن تعرف القدرة الحصانية لمحركها ، فمن المعروف أن السيارة الأعلى فى القدرة الحصانية أكثر فعالية فى عملية التسارع . لنتعلم الآن المعنى الدقيق للقدرة .

القدرة : مقياس لمعدل بذل الشغل ، ومعادلة تعريفها هى :

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{زمن بذل الشغل}}$$

أو ، بالرموز :

$$P = \frac{W}{t} \qquad (5-2)$$

وعندما يكون الشغل W مقيسًا بالجول والزمن t بالثانية فإن وحدة القدرة تكون جول لكل ثانية وتسمى واط (W) نسبة إلى جيمس واط مخترع المحرك البخارى .

$$1\ \text{watt} = \frac{1\ \text{J}}{\text{s}}$$

ولكن القدرة للمواتير والمحركات تقاس عادة بالقدرة الحصانية (hp) ، حيث :

$$1\ \text{hp} = 746\ \text{W}$$

وبالطبع ، حيث أن الواط هو وحدة القدرة فى النظام SI فمن الواجب استخدامها هى وليس القدرة الحصانية فى معادلاتنا . فالموتور الكهربائى الذى قدرته القدرة $\frac{1}{4}$ hp مثلا يمكنه أن ينتج قدرة تساوى :

$$\left(\frac{1}{4}\text{hp}\right)\left(746\frac{\text{W}}{\text{hp}}\right) = 186\ \text{W}$$

هذا يعنى أن الموتور يمكنه أن يبذل 186 J من الشغل كل ثانية .

يمكننا الحصول على علاقة مناسبة أخرى للقدرة بملاحظة أن الشغل المبذول على جسم ما بواسطة القوة F_x عندما يزاح الجسم تحت تأثير القوة مسافة قدرها x هو $F_x\, x$. وباستخدام هذا التعبير فى المعادلة (2–5) نجد أن :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F_x x}{t} = F_x\left(\frac{x}{t}\right)$$

والآن ، حيث أن x/t يساوى مقدار السرعة التى يتحرك بها الجسم فى الاتجاه x ، إذن :

$$P = F_x\, v_x \qquad (5-3)$$

أو :

$$P = Fv\cos\theta$$

حيث θ هى الزاوية بين $\mathbf{F}$ و $\mathbf{v}$. وتفترض المعادلتان (2–5) و (3–5) أن خرج القدرة ثابت . أما إذا تغيرت F_x أو v_x أو تغيرتا كلتاهما مع الزمن فإن المعادلة (2–5) سوف تعطى القدرة المتوسطة خلال الفترة الزمنية t ، بينما ستعطى المعادلة (3–5) القدرة اللحظية عند اللحظة التى تعطى عندها F_x و v_x .

المعادلة (2–5) تستخدم لتعريف إحدى الوحدات الشائع استخدامها لتقدير الشغل . لاحظ أن :

الزمن × القدرة = الشغل

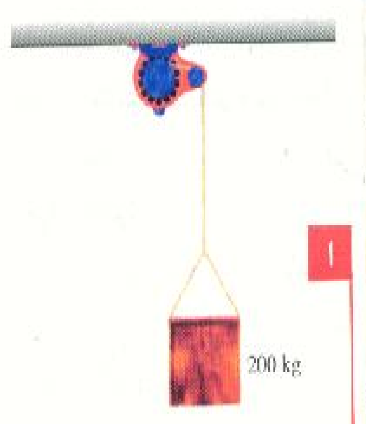
فإذا قيست القدرة بالكيلو واط والزمن بالساعة فإن وحدة الشغل المبذول بواسطة مصدر للقدرة تكون كيلو واط × ساعة ، وهذه الوحدة للشغل تسمى الكيلو واط ساعة . والعلاقة

بين هذه الوحدة والجول هى :

$$1\,kWh = (1kWh)\left(1000\frac{W}{kW}\right)\left(3600\frac{s}{h}\right) = 3.60 \times 10^6\,W.s = 3.60 \times 10^6\,J$$

مثال 5-2 :

الموتور المبين بالشكل 5-5 يستطيع رفع جسم كتلته 200 kg بسرعة ثابتة قدرها 3.00 cm/s . ما القدرة التى ينتجها الموتور بالقدرة الحصانية ؟



شكل 5-5 :
يراد إيجاد خرج قدرة الموتور عندما يرفع الجسم بسرعة ثابتة قدرها 3.00 cm/s .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الكميات الواجب معرفتها لحساب القدرة المنتجة بواسطة الموتور ؟

الإجابة : يمكن حل هذه المسألة باستخدام المعادلة (5-2) أو (5-3) وحيث أن سرعة الجسم معلومة فإن المعادلة (5-3) مناسبة أكثر من الأخرى .

سؤال : ما الشرط الذى تتعين به القوة التى يؤثر بها الموتور على الجسم ؟

الإجابة : الموتور يرفع الحمل بسرعة ثابتة . وبما أن صافى القوة يساوى صفراً ، فإن القوة المؤثرة بواسطة الموتور يجب أن تساوى وزن الحمل : $F = mg$.

سؤال : ما معادلة القدرة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : حيث أن السرعة والقوة فى نفس الاتجاه $(\theta = 0)$ ، إذن $P = Fv$.

الحل والمناقشة : بالتعويض بالقيم المعطاة :

$$F = (200\,kg)(9.8\,m/s^2) = 1960\,N$$

$$P = (1960\,N)(0.0300\,m/s) = 58.8\,N.m/s = 58.8\,W$$

وبالتحويل إلى القدرة الحصانية نجد أن :

$$58.8\,W\frac{1\,hp}{746\,W} = 0.0788\,hp$$

ولكى نرى ارتباط هذه الطريقة بالمعادلة (5-2) ، لنستعمل المسافة التى يقطعها الجسم فى ثانية واحدة ، أى $s = 3.00$ cm . الشغل المبذول بواسطة الموتور خلال هذه السافة هو :

$$W = Fs = (1960\,N)(0.0300\,m) = 58.8\,J$$

وحيث أن هذا الشغل قد بذل فى زمن قدره 1 s ، فإن القدرة تكون :

$$P = W/t = 58.8\,J/s = 58.8\,W$$

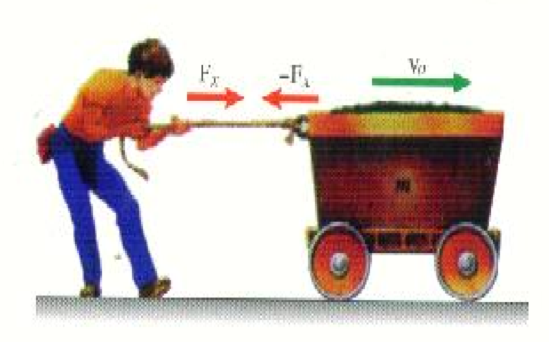
تمرين : ما قيمة خرج قدرة الموتور بالواط عند خفض الحمل بسرعة ثابتة قدرها 3.00 cm/s .

الإجابة : -58.8 W .

5-3 طاقة الحركة

يقال أن للجسم طاقة إذا كان قادرًا على بذل الشغل . لهذا السبب **يقال عادة أن الطاقة هى المقدرة على بذل الشغل** . وبالرغم من أن مفهوم الطاقة ، كما سوف نرى ، أكثر تعقيدًا من أن يوصف وصفًا تامًا بهذه العبارة المختصرة ، فإن ربط الطاقة بالشغل مازال مفيدا . وهناك أنواع كثيرة من الطاقة ، ولكننا نبدأ دراستنا بمناقشة طاقة الحركة .

من المكن أن تكسر كرة البيسبول المتحركة نافذة عند اصطدامها بها ، كما أن المطرقة المتحركة يمكنها أن تدخل مسمارًا فى الخشب ، وكذلك يمكن للحجر المتحرك إلى أعلى أن يرتفع ضد قوة الجاذبية . من الواضح إذن أن الأجسام المتحركة لها قدرة على بذل الشغل ، أى أن لها طاقة . وسوف نسمى الطاقة التى يمتلكها جسم بسبب حركته **بطاقة الحركة*** (KE) .



شكل 6-5:
العربة تفقد طاقة حركة مع تباطؤها نتيجة لشد الشخص لها إلى الخلف .

وكمثال محدد ، لنفرض أن عربة محملة كتلتها الكلية m تندفع بسرعة قدرها v_0 كما بالشكل 6-5 . وكما هو واضح من الشكل ، هناك شخص يقوم بشد العربة بقوة ثابتة $-F_x$ محاولاً إيقافها . وطبقًا لقانون نيوتن الثالث تؤثر العربة على هذا الشخص بقوة مساوية فى المقدار واتجاها إلى الأمام . فإذا تحركت العربة والشخص مسافة قدرها x فإن الشغل المبذول بواسطة العربة على الشخص يكون :

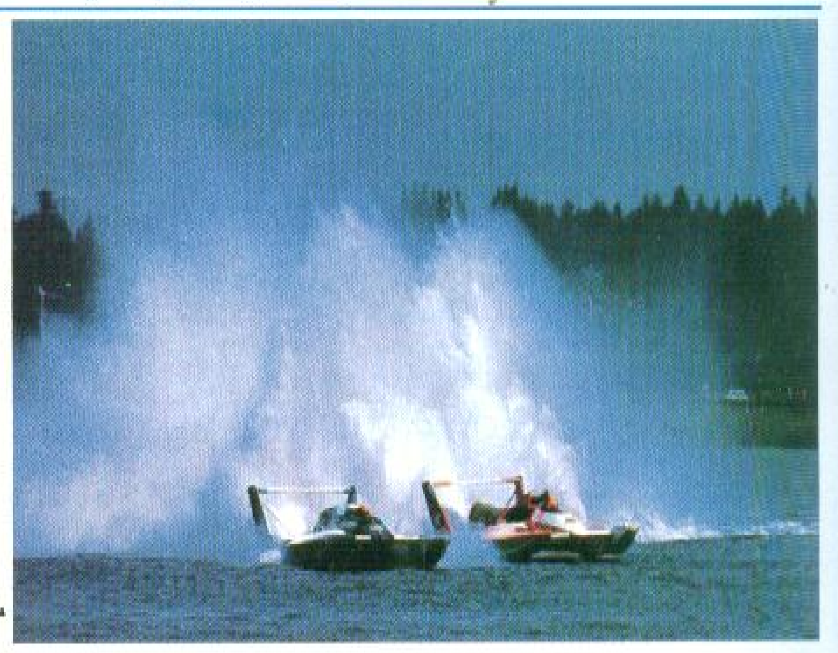
$$W = F_x\, x \quad (\text{على الشخص})$$

لنربط الآن هذه الكمية من الشغل بالتغير الناتج فى حركة العربة .
حيث أن القوة المعوقة $-F_x$ تؤثر على العربة فإن العربة لابد أن تتباطأ . وطبقًا لقانون نيوتن الثانى :

$$a_x = \frac{-F_x}{m}$$

وباستعمال معادلة الحركة $v_f^2 - v_0^2 = 2a_x\, x$ (المعادلة 9-2) فى التعويض عن a_x

* اشتقت هذه الصفة من الكلمة اليونانية Kinetikos ومعناها يحرك تذكر أننا استخدمنا المصطلح « كينماتيكا » فى الفصل الثانى لوصف دراستنا للحركة كما أطلقنا اسم « الاحتكاك الحركى » فى الفصل الثالث على الاحتكاك الانزلاقى .



مثال مثير للإعجاب عن طاقة الحركة .

بالقدار $(v_f^2 - v_0^2)/2x$ نجد أن :

$$F_x = -\left(\frac{m}{2x}\right)(v_f^2 - v_0^2)$$

وبالتعويض عن F_x بهذه الكمية فى معادلة الشغل المبذول على الشخص نحصل على :

$$W = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_f^2 \quad \text{(على الشخص)} \tag{5-4}$$

هذا التعبير يعطينا كمية الشغل المبذول بواسطة جسم متحرك عندما يتباطأ من سرعة مقدارها v_0 إلى سرعة مقدارها v_f . فإذا ما وصلت العربة إلى السكون ، حيث تصبح $v_f = 0$ فإن الشغل الذى تعلكه يكون $\frac{1}{2}mv_0^2$. يستنتج من ذلك إذن أن الجسم الذى كتلته m والمتحرك بسرعة مقدارها v يستطيع أن يبذل شغلاً قدره $\frac{1}{2}mv^2$ قبل أن يصل إلى حالة السكون .

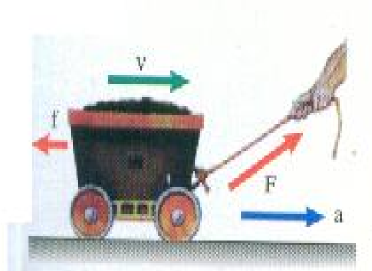
باستخدام هذا المنطق يمكن تعريف طاقة حركة جسم بالطريقة الآتية :

طاقة حركة (KE) جسم كتلته m يتحرك بسرعة مقدارها v هى :

$$\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2 \tag{5-5}$$

ويمكنك أن تتحقق بسرعة باستخدام المعادلة (5-5) أن وحدة طاقة الحركة فى النظام SI هى نفس وحدة الشغل ، أى الجول . لاحظ أن طاقة الحركة كمية غير متجهة ، مثلها فى ذلك مثل جميع أشكال الطاقة الأخرى . وأيضا ، حيث أن الكتلة m ومربع مقدار السرعة v^2 كميتان موجبتان فإن طاقة الحركة موجبة كذلك .

4–5 نظرية الشغل والطاقة لصافي القوة



شكل 7–5 :
القوة المحصلة المؤثرة على العربة تسبب تناقص طاقة حركتها .

سنقوم في هذا القسم باستنتاج علاقة بين الشغل المبذول على جسم والتغير في طاقة حركته . كان بالإمكان طبعًا تحقيق ذلك بحساب الشغل المبذول بواسطة العربة المبينة بالشكل 6–5 ، ولكننا سنأخذ حالة أكثر عمومية كالوقف المبين بالشكل 7–5 الذى يمثل عربة كتلتها m تتحرك في الاتجاه الموجب للمحور x تحت تأثير قوتين . لنرمز إلى القوة المحصلة المؤثرة على العربة بالرمز $\mathbf{F}_{\text{net}}$. وحيث أن الحركة في اتجاه المحور x فإن العلاقة $\mathbf{F}_{\text{net}} = ma$ تصبح :



$$F_{\text{net}} = ma_x$$

وكما فعلنا في القسم السابق ، سوف نستخدم المعادلة (9–2) للتعويض عن a_x بدلالة السرعتين الابتدائية والنهائية للجسم والمسافة المقطوعة x لنحصل على :

$$F_{\text{net}}\,x = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

ولكن $F_{\text{net}}\,x$ ببساطة هي الشغل المبذول على العربة بواسطة القوة المحصلة المؤثرة عليها . إذن ، يمكن تلخيص نتيجتنا في الشكل الآتي :

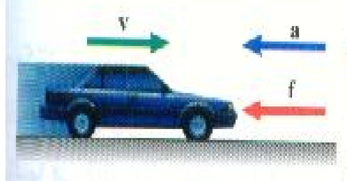
التغير في KE للجسم = الشغل المبذول على العربة بواسطة F_{net}

$$F_{\text{net}} \text{ الشغل المبذول بواسطة } = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \Delta\text{KE} \qquad (5\text{–}6)$$

هذه العلاقة تسمى **نظرية الشغل والطاقة لصافي القوة** . وعند تطبيق هذه النظرية علينا أن نعي تمامًا أنه إذا كان صافي القوة في اتجاه الحركة فإنه يؤدي إلى تسارع الجسم وبالتالي إلى زيادة طاقة حركته . أما القوى المعوقة ، كالاحتكاك مثلاً ، فإنها تبذل شغلاً سالبًا على الجسم . السبب المباشر لذلك هو أن اتجاه القوة المعوقة يكون مضادا لاتجاه الإزاحة ، وعليه فإن الكمية $F_x\,x\cos\theta$ تصبح $F_x\,x\cos 180^\circ$ ؛ أي $-F_x\,x$. وهكذا يمكن القول أن صافي القوة المعوقة يؤدي إلى نقص طاقة الحركة :

صافي القوة في اتجاه الحركة يسبب زيادة طاقة حركة الجسم ، بينما يسبب صافي قوة الإيقاف نقص طاقة الحركة .

وتعتبر نظرية الشغل والطاقة نظرية في غاية الأهمية ، وسوف نستخدمها كثيرًا في مختلف فروع الفيزياء .



شكل 8–5 :
صافي القوة المؤثر على العربة يساوي f .

مثال 3-5 :

سيارة كتلتها 2000 kg تتحرك بسرعة مقدارها 20 m/s على أرض مستوية . بدأت السيارة في التباطؤ في لحظة معينة فتوقفت بعد مسافة قدرها 100 m . ما مقدار متوسط قوة الاحتكاك المؤثرة على السيارة ؟ انظر الشكل 8–5 .

استدلال منطقى :

سؤال : هل توجد أى قوة أخرى مؤثرة فى الاتجاه الأفقى خلاف الاحتكاك ؟

الإجابة : لا .

سؤال : ما المبدأ الذى يربط متوسط قوة الاحتكاك f بتوقف السيارة ؟

الإجابة : يمكن الرجوع إلى معادلات الكينماتيكا (2-11أ إلى 2-11هـ) لإيجاد عجلة السيارة ثم إيجاد f من قانون نيوتن الثانى كما فعلنا فى الفصل الثالث ، كذلك يمكن استخدام نظرية الشغل والطاقة لصافى القوة والتى تنص على أن التغير فى طاقة الحركة يساوى الشغل المبذول بواسطة صافى القوة . ومن أهم مميزات نظرية الشغل والطاقة أنها تتيح لنا فرصة استخدام الكميات القياسية فى الحسابات مما يبسط الحل فى كثير من الحالات .

سؤال : هل تسمح معطيات المسألة بحساب ΔKE ؟

الإجابة : نعم . $\Delta KE = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ ، حيث $v_f = 0$.

سؤال : ما هى معادلة الشغل التى يمكن استخدامها فى هذه الحالة ؟

الإجابة : $W = fs \cos 180°$ ، لأن f و s فى اتجاهين متضادين .

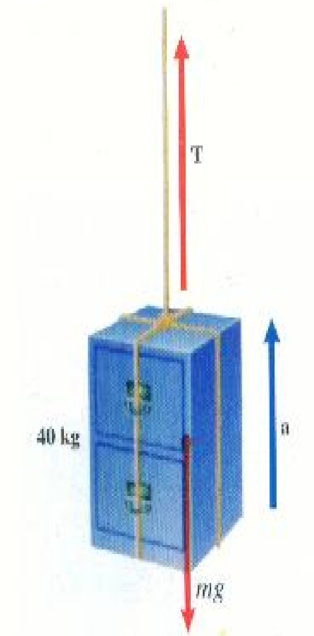
الحل والمناقشة : تقول نظرية الشغل والطاقة أن :

$$\frac{1}{2}\ [0-(2000\ kg)(20\ m/s)^2] = f(100\ m)(-1)$$

ومنه :

$$f = \frac{\frac{1}{2}(2000\ kg)(400\ m^2/s^2)}{100\ m} = 4000\ kg.m/s^2 = 4000\ N$$

تمرين : إذا كانت قوة الاحتكاك المؤثرة على السيارة فى المثال 5-3 ثابتة وتساوى 4000 N ، استخدم نظرية الشغل والطاقة لإيجاد مقدار سرعة السيارة بعد أن تقطع مسافة قدرها 50 m . الإجابة : 14.1 m/s .



شكل 5-9 :
لكى يتسارع الجسم رأسيًا إلى أعلى يجب أن يكون T أكبر من mg .

مثال 5-4 :

يراد رفع خزانة ملفات كتلتها 40 kg رأسيًا إلى أعلى كما بالشكل 5-9 بحيث تتسارع من السكون إلى سرعة مقدارها 0.30 m/s خلال مسافة قدرها 50 cm . استخدم نظرية الشغل والطاقة لإيجاد الشد اللازم فى الحبل .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف تتضمن نظرية الشغل والطاقة الشد فى الحبل ؟

الإجابة : الشد هو إحدى القوى المكونة لصافى القوة ، وصافى القوة يبذل شغلاً مساويًا للتغير فى طاقة الحركة .

سؤال : ما قيمة صافي القوة المؤثرة على الخزانة ؟

الإجابة : $T-mg$. واتجاه صافي القوة هذا يجب أن يكون رأسيًا إلى أعلى لكي يتسارع الجسم إلى أعلى .

سؤال : ما قيمة الشغل الذى يبذله صافي القوة ؟

الإجابة : حيث أن F_{net} والإزاحة s متوازيان ، إذن $\cos\theta = 1$ و $W=(T-mg)s$.

سؤال : ما المعادلة التى تعطيها نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة : $(T-mg)s = \frac{1}{2}mv_f^2 - 0$ ، حيث T هو المجهول الوحيد .

الحل والمناقشة : بحل المعادلة الأخيرة بالنسبة إلى T .

$$T = \frac{\frac{1}{2}mv_f^2}{0} + mg = \frac{\frac{1}{2}(40\text{ kg})(0.30\text{ m/s})^2}{0.50\text{ m}} + (40\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2) = 396\text{ N}$$

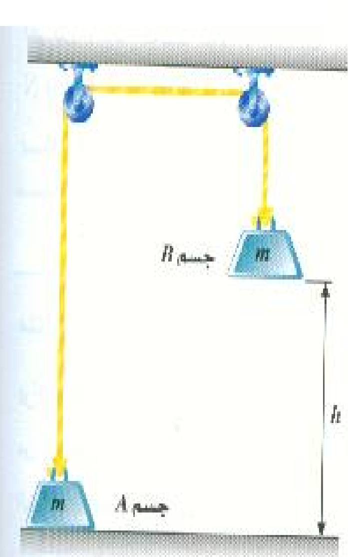
لاحظ أن الشغل المبذول بواسطة الشد هو $Ts = (396\text{ N})(0.50\text{ m}) = 198\text{ J}$. أما الشغل المبذول بواسطة الجاذبية فيساوى :

$$-mgs = -(40\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2)(0.50\text{ m}) = -196\text{ J}$$

تمرين : إذا كان الحبل ينقطع عندما يزيد الشد عن 600 N ، فما أكبر سرعة يمكن أن تعطى للخزانة خلال المسافة 50 cm المطلوب أن ترتفعها الخزنة ؟ **الإجابة** : 2.28 m/s .

5-5 طاقة الجهد التثاقلي

رأينا فيما سبق أن بعض الأجسام يمكنها أن تبذل شغلاً بفضل حركتها فيكون لديها طاقة حركة . لكن هناك أجسام أخرى تستطيع أن تبذل شغلاً إما بسبب موضعها أو بسبب شكلها ، وعندئذ يقال أن مثل هذه الأجسام لها **طاقة جهد (أو طاقة وضع)** . لنبدأ دراستنا لطاقة الوضع بمناقشة الطاقة التى يكتسبها جسم بسبب قوى الجاذبية .



شكل 5-10 :
عند سقوط الجسم B فإنه يبذل شغلاً على الجسم A .

تأمل النظام المبين بالشكل 5-10 الذى يمثل بكرتين لا احتكاكيتين تحملان جسمين متساويي الكتلة أى أن وزن الجسمين واحد ويساوى mg . وعليه ، فإذا دُفع الجسم B دفعة صغيرة إلى أسفل فإنه سوف يبدأ فى السقوط ببطء تجاه الأرضية بسرعة ثابتة المقدار ، وسوف يبدأ الجسم A فى الارتفاع إلى أعلى فى نفس الوقت . وعندما يكون الجسم B قد سقط مسافة h تجاه الأرضية سيكون الجسم A قد ارتفع نفس المسافة h عن الأرضية .

الآن نسأل : ما مقدار الشغل المبذول بواسطة الحبل على الجسم A أثناء رفعه من سطح الأرضية بسرعة ثابتة المقدار ؟ حيث أن الشد فى الحبل يساوى وزن الجسم A وهو mg فإن الشغل المبذول بواسطة الحبل ، طبقًا لتعريف الشغل هو :

الشغل المبذول أثناء الرفع = (الشد) (المسافة) = mgh .

من أو ما هو العامل الخارجي الذي يبذل هذا الشغل ؟ بما أن الجسم B يشد الجسم A إلى أعلى ، إذن الجسم B هو الذي يبذل الشغل . يستنتج من ذلك إذن أن الجسم B كان لديه القدرة على بذل الشغل عندما كان معلقًا في موضعه الابتدائي فوق الأرضية ، وكمية الشغل التي يمكن أن يبذلها الجسم B تساوي mgh ، حيث h المسافة التي يسقط منها الجسم B . بناء على ذلك يمكننا وضع التعريف الآتي :

$$\text{(GPE)} \quad \text{طاقة الجهد التثاقلي} = mgh \qquad (5\text{-}7)$$

ومرة أخرى نكرر أن وحدة GPE في النظام SI مثلها في ذلك مثل جميع أشكال الطاقة ، هي الجول .

من الجدير بالذكر أن طاقة الجهد التثاقلي لا يمكن تعيين قيمتها المطلقة . بل أنها تعتمد على الموضع الرأسي المستخدم كنقطة إسناد مرجعية . فإذا اختار شخصان مختلفان مستويي إسناد مختلفين لحساب GPE في حالة معينة ما فإنهما سيحصلان قيمتين تختلف إحداهما عن الأخرى بمقدار ثابت معين . لنأخذ على سبيل المثال حالة الكرة المبينة بالشكل 11–5 . إذا اعتبر شخص ما أن سطح المنضدة هو مستوى الإسناد ستكون GPE للكرة mgh_1 ، ولكن شخصًا آخر يختار مستوى الأرضية كمستوى إسناد سيقول أن GPE للكرة هي mgh_2 . كلتا القيمتان **صحيحتان** طالما كان مستوى الإسناد معروفًا .

الكمية التي لها معنى من وجهة نظر الفيزياء هي التغير في طاقة الوضع نتيجة لتغير الوضع الرأسي للجسم . فإذا سقطت الكرة المبينة في الشكل 11–5 مسافة قدرها 1 m فإن التغير في موضعها سيكون واحدًا بالنسبة لأي مستوى إسناد نختاره .

من الممكن أن تكون طاقة الوضع سالبة . لنفرض مثلاً أننا نقيس المسافة بالنسبة إلى السطح العلوي للمنضدة . عندما تكون الكرة على بعد h فوق المنضدة ستكون طاقة وضعها mgh ، وإذا أنزلت إلى سطح المنضدة سوف تقل طاقة وضعها إلى الصفر . أما إذا أنزلت أكثر من ذلك سيكون الإحداثي y سالبًا ومن ثم تصبح طاقة الجهد التثاقلية سالبة . هذا يعني ببساطة أن طاقة وضع الكرة أسفل المنضدة أقل من قيمتها على سطح المنضدة ، وهو الوضع الصفري المختار اعتباطيًا لطاقة الوضع . ولإعادة الكرة إلى المستوى الصفري لطاقة الوضع يجب رفعها إلى مستوى سطح المنضدة مرة أخرى .

شكل 11–5 : الأرضية وسطح المنضدة يمثلان اختيارين مناسبين لمستوى الإسناد الذي يقاس الارتفاع بالنسبة إليه . وعليه فإن طاقة الجهد التثاقلي قد تكون mgh_1 أو mgh_2 تبعا لمستوى الإسناد المختار . لاحظ أن الفرق بين القيمتين يساوي مقدارا ثابتا هو mgh_3 .

هذا رباع طوله 1.6 m . هل يمكنك أن تحسب قيمة تقريبية لطاقة الجهد التثاقلي للأوزان التي يحملها بالنسبة للأرضية ؟

مثال توضيحي 3–5

أنت في غرفة يرتفع سقفها عن أرضيتها بمقدار 3.00 m ويوجد بها منضدة ارتفاعها 1.10 m بالنسبة للأرضية . هذه المنضدة تحمل على سطحها كيسًا من الدقيق كتلته 2.27 kg .

الجزء (أ) : ما قيمة طاقة الجهد التثاقلي للكيس بالنسبة إلى (أ) الأرضية ؟ (ب) سطح المنضدة ؟ (جـ) سقف الغرفة ؟

استدلال منطقى : وزن الكيس فى كل حالة هو $mg = 22.2\ N$ ، والمواضع الرأسية للكيس بالنسبة إلى مستويات الإسناد الثلاثة هى :

$$h_a = (1.10\ m) \qquad h_b = 0 \qquad h_c = -1.90\ m$$

إذن ، القيم الثلاث لطاقة الجهد التثاقلى GPE تكون :

(أ) $GPE = (22.2\ N)(1.10\ m) = 24.4\ J$

(ب) $GPE = 0$

(جـ) $GPE = (22.2\ N)(-1.90\ m) = -42.2\ J$

الجزء (ب) : ما مقدار التغير فى GPE بالنسبة إلى مستويات الإسناد الثلاثة فى الجزء (أ) إذا حرك الكيس من سطح المنضدة إلى الأرضية ؟

استدلال منطقى : بما أن mg مقدار ثابت فإن ΔGPE عمومًا تكون :

$$\Delta GPE = \Delta(mhg) = mg\Delta h$$

وحيث أن $\Delta h = -1.10\ m$ فى كل من هذه الحالات الثلاث ، إذن :

$$\Delta GPE = (22.2\ N)(-1.10\ m) = -24.4\ J$$

ومن ثم تكون التغيرات فى ΔGPE فى كل من هذه الحالات كما يأتى :

(أ) $\Delta GPE = 0 - (+24.4\ J) = -24.4\ J$

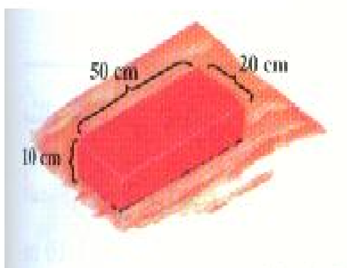
(ب) $\Delta GPE = -24.4 - 0 = -24.4\ J$

(جـ) $\Delta GPE = -66.6\ J - (-42.2\ J) = -24.4\ J$

وهكذا فإن التغير فى GPE لا يعتمد على مستوى الإسناد المختار . هذه التغيرات فقط هى التى تحمل معنى فيزيائيًا .

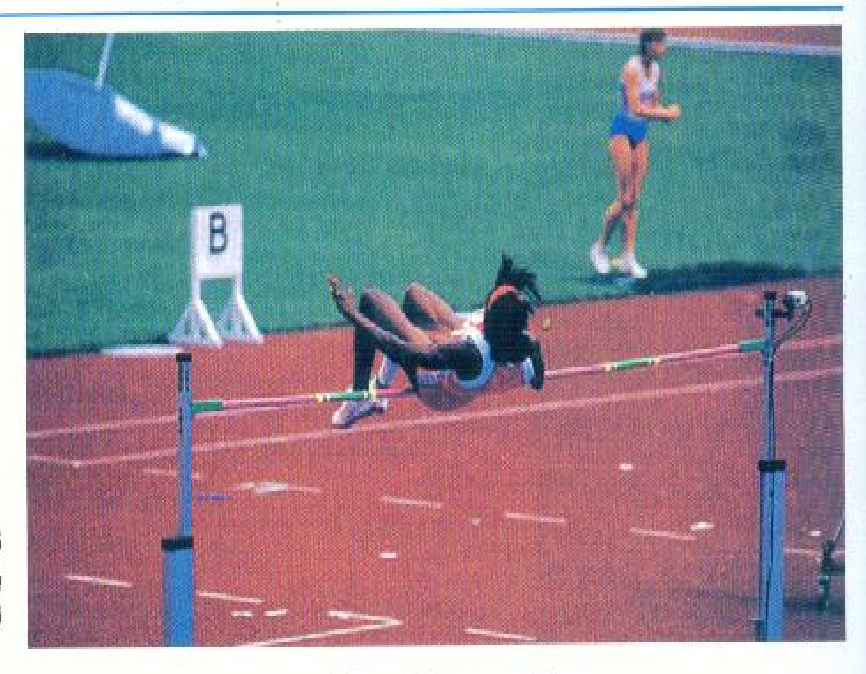
5-6 مركز الكتلة

فى مناقشتنا السابقة لطاقة الجهد التثاقلى اعتبرنا الأجسام نقطًا كتلية (مادية) لا حجم لها . وعند حساب GPE للأجسام الحقيقية لابد أن نتساءل من أى نقطة يقاس ارتفاع الجسم عن مستوى الإسناد ؟ إذا رفع الجسم بحيث لا يعانى أى دوران ، فإن كل نقط الجسم سوف ترتفع بنفس المقدار ، ومن ثم يمكن استخدام أى نقطة لقياس GPE . ولكن لنفرض مثلاً أننا نعالج حالة قالب مستطيل منتظم مستقر على وجهه الأكبر كما هو مبين بالشكل 12-5 . ما مقدار الشغل اللازم بذله لكى يقلب هذا القالب على أصغر وجه له ؟



شكل 12-5 : قالب منتظم متجانس على سطح منضدة . ما مقدار الشغل اللازم لإيقاف القالب على الوجه الأصغر ؟

بناء على مناقشاتنا السابقة يمكن القول أن هذا الشغل يساوى الزيادة فى GPE لأن الأنواع الأخرى من طاقة القالب لا تتغير :



تقوس لاعبة الوثب العالى جسمها بحيث يكون مركز كتلتها منخفضا عن قضيب تحديد الارتفاع .

$$W = \Delta GPE = mg\,\Delta h$$

لاحظ مع ذلك أن ارتفاعات جميع نقط القالب لا تتغير بنفس المقدار . وحيث أن مختلف أجزاء القالب تتغير ارتفاعاتها الرأسية بمقادير مختلفة لن يمكننا تحديد قيمة Δh بشكل حاسم .

إن مفتاح الحل لمعرفة قيمة Δh الواجب استخدامها فى المعادلة السابقة هو ما يسمى **مركز كتلة (c.m.)** الجسم . وقد سبق أن عرفنا مركز الثقل فى الفصل الرابع بأنه نقطة تأثير قوة الجاذبية على الجسم . فإذا كانت عجلة الجاذبية عند مختلف نقط الجسم ثابتة فإن مركز الثقل ينطبق على مركز الكتلة ، وهذا ينطبق على معظم المسائل التى سنقابلها فى هذا الكتاب . كذلك وجدنا فى الفصل الرابع أن مركز ثقل .c.g الأجسام المتماثلة هندسيًا والمنتظمة الكثافة يقع فى مراكزها الهندسية ، وبناء على ذلك يمكننا اعتبار أن مركز كتلة .c.m مثل هذه الأجسام يقع أيضًا فى **مراكزها الهندسية** . (من الممكن بالطبع إيجاد مركز كتلة .c.m أى جسم غير متماثل هندسيًا أو غير منتظم الكثافة وذلك من تعريف مركز الكتلة ، ولكننا لن نحتاج إلى ذلك هنا) .

الآن يمكننا استخدام مفهوم مركز الكتلة لتحديد معنى Δh :

التغير فى طاقة الجهد التثاقلى لجسم يعتمد على التغير فى الموضع الرأسى لمركز كتلة ذلك الجسم .

إذن ، بالقرب من سطح الأرض ، يمكن كتابة العلاقة :

$$\Delta GPE = mg\,\Delta h_{c.m.} \tag{5-8}$$

مثال توضيحى 4-5

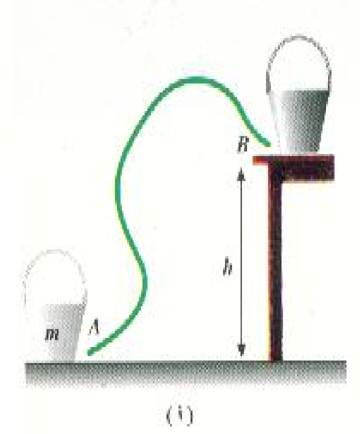
احسب الشغل اللازم لرفع القالب المبين بالشكل 12-5 بحيث يقف على الوجه الأصغر . كتلة القالب 10 kg .

استدلال منطقى : نحتاج إلى تعيين الموضعين الابتدائى والنهائى لمركز كتلة القالب . وحيث أن القالب منتظم يمكن اعتبار أن c.m. يقع فى المركز الهندسي . وبالرجوع إلى الشكل 12–5 سنرى أن هذه النقطة ترتفع بمقدار 5 cm عن سطح المنضدة عندما ينام القالب على الوجه الأكبر . أما إذا كان القالب واقفاً على الوجه الأصغر سوف يقع c.m. على بعد 25 cm من سطح المنضدة وعليه فإن $\Delta h_{c.m.} = 20\ cm = 0.20\ m$ ، وبذلك يكون ΔGPE :

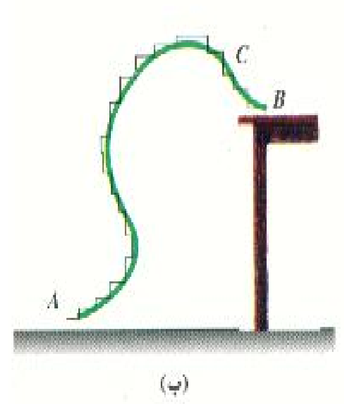
$$\Delta GPE = mg\ \Delta h_{c.m.} = (10\ kg)(9.8\ m/s^2)(0.20\ m)$$

هذه هى كمية الشغل اللازم لقلب القالب على وجهه الأكبر . ■

5-7 قوة الجاذبية قوة محافظة



(أ)



(ب)

شكل 13–5 : يمكن تقريب المسار المبين فى (أ) بسلسلة من الخطوات الأفقية والرأسية الموضحة فى (ب) .

لكى نرفع جسمًا رأسيًا إلى أعلى بسرعة ثابتة المقدار فإننا نحتاج إلى قوة تساوى وزن الجسم mg ، ونتيجة لذلك سيكون الشغل المبذول فى رفع الجسم رأسيًا إلى أعلى مسافة قدرها h هو mgh . سوف نثبت الآن أن نفس هذه النتيجة تظل صحيحة حتى إذا لم يرفع الجسم إلى أعلى فى شكل رأسى .

لنفرض أننا نريد رفع الدلو المبين بالشكل 13–5 أ من الأرضية إلى سطح المنضدة . ما مقدار الشغل اللازم بذله لتحقيق ذلك ؟ دعنا نرفع الجسم على طول المسار الممثل بالخط الواصل بين A و B بحيث تكون قوة الرفع متجهة رأسيًا إلى أعلى خلال الحركة كلها .

لحساب الشغل المبذول فى رفع الدلو من A إلى B يمكننا تقريب المسار الفعلى إلى مسار مدرج كالمبين بالجزء (ب) من الشكل . بجعل أطوال الدرجات صغيرة جدًا سيصبح المسار المدرج مماثلاً للمسار الأملس المبين بالشكل 13–5ب . ونظرًا لأن قوة الرفع رأسية كما نعلم فإنها لا تبذل أى شغل فى الحركات الأفقية على المسار المدرج ، أى أن قوة الرفع تبذل شغلاً فى الحركات الرأسية فقط . يلاحظ كذلك أن الشغل المبذول يكون موجبًا عند ارتفاع الدلو ، ولكنه يكون سالبًا إذا انخفض الجسم فى أى نقطة على مساره (بالقرب من C مثلا) . معنى ذلك أن الشغل المبذول فى الحركات الرأسية إلى أسفل يلاشى الشغل المبذول فى الحركات الرأسية المكافئة إلى أعلى . ويستنتج من ذلك أن الشغل المبذول يعتمد فقط على صافى تأثير جميع الحركات الرأسية . الخلاصة إذن أن انتقال الدلو وكتلته m ، من A إلى B معناه أن الدلو قد ارتفع إلى أعلى مسافة قدرها h ، ومن ثم فإن الشكل المبذول فى هذه العملية يساوى mgh وهو نفس الشغل المبذول فى رفع الجسم من A مسافة رأسية قدرها h ثم تحريكه جانبًا إلى النقطة B . وحيث أن المسار الموضح من A إلى B اختيارى تمامًا فى الواقع يمكننا استنتاج أنه :

إذا كانت النقطة A تقع على بعد قدره h تحت النقطة B فإن الشغل المبذول ضد قوة الجاذبية لرفع كتلة قدرها m من A إلى B يساوى mgh .

هذه النتيجة صحيحة لأى مسار بين A و B طالما لم تتغير g نتيجة للانتقال من A إلى B . ومن الطبيعي أنه إذا خفضت الكتلة من B إلى A فإن الشغل المبذول ضد الجاذبية سيكون $-mgh$.

قوة الجاذبية مثال لما يسمى **بالقوة المحافظة** .

يقال أن القوة محافظة إذا كان الشغل المبذول فى تحريك جسم من نقطة A إلى أخرى B ضد هذه القوة لا يعتمد على مسار الحركة .

وسوف نرى فيما بعد أن القوى الكهروستاتيكية والنووية هي قوى محافظة . هذا صحيح أيضًا بالنسبة للقوى المرنة مثل القوى المتولدة فى زنبرك ممتد أو منضغط . أما قوى الاحتكاك ، من ناحية أخرى ، فهي قوى غير محافظة . هذا ما يمكنك التحقق منه بسهولة بأن تزلق كتابك من نقطة إلى أخرى على منضدة حيث سيتضح لك أنك ستضطر إلى بذل شغل أكبر عندما تزلقه فى مسار معقد طويل عنه فى حالة اتباعك لمسار على هيئة خط مستقيم . بناء على ذلك يقال لقوة بأنها قوة غير محافظة إذا كان الشغل المبذول بواسطة القوة يعتمد على مسار الحركة بين نقطتين معينتين ، كما فى حالة الاحتكاك .

الطريقة المكافئة الأخرى للتمييز بين القوى المحافظة وغير المحافظة هى أنه من الممكن تعريف طاقة جهد مرتبطة بالقوة المحافظة ، بينما هذا غير ممكن فى حالة القوى غير المحافظة لأنها تعتمد على المسار وليس على مجرد الموضع فقط .

ولكى نرى لماذا توصف بعض القوى بأنها محافظة سوف تعرف **الطاقة الميكانيكية** (ME) للنظام بأنها مجموع طاقتى الحركة والجهد لهذا النظام :

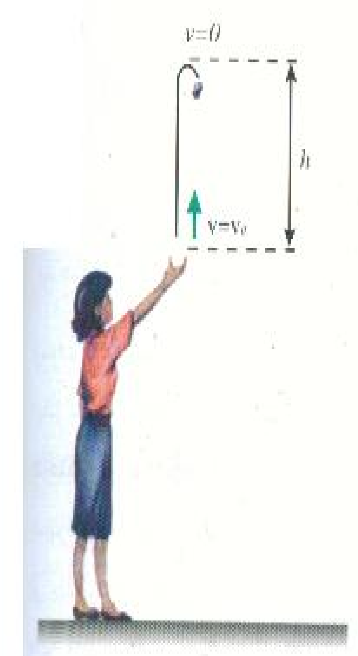
$$ME = KE + PE$$

حيث يمكن أن يتضمن الحد الممثل **لطاقة الجهد** فى هذا التعريف أكثر من نوع واحد من طاقة الجهد عندما يؤثر على النظام أكثر من قوة محافظة واحدة . وهنا نجد أن الطاقة الميكانيكية للنظام تظل محفوظة ، أو ثابتة ، أثناء حركة النظام تحت تأثير القوة المحافظة فقط . ومن ثم يمكننا تلخيص خاصية فى غاية الأهمية للقوى المحافظة على الصورة الآتية :

القوى المحافظة هى تلك القوة التى تحفظ الطاقة الميكانيكية للنظام .

هذه الصيغة هى إحدى صور صيغة أكثر عمومية تسمى بقاء الطاقة ، والتى سوف نتعرض لمناقشتها فى فصول لاحقة . هذا وتعتبر قوانين البقاء من أهم القوانين فى الفيزياء عمومًا إذ أنها تخبرنا أى الكميات الفيزيائية تظل ثابتة عند حدوث تغيرات فى النظام الفيزيائى .

5-8 التحول المتبادل لطاقتى الحركة والوضع



شكل 14-5 :
تتحول طاقة حركة قطعة العملة المعدنيـة إلى طاقة جهد تثاقلى أثناء حركتـها إلـى أعلى . كذلك تتحول طاقة الوضـع مـرة ثانية إلى طاقة حركة أثناء السقوط .

فى كل مرة تقذف فيها جسمًا فى الـهواء أو تسقطه فيه فإنك ترى مثالا للتحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الجهد التثاقلى . فمثلا ، عندما تقـذف قطعة عملة معدنية إلى أعلى تتحول طاقة حركتها إلى طاقة جهد تثاقلى ، وهذا ما سنقوم بإثباته حالاً .

نرى فى الشكل 14-5 شخصًا يقذف قطعة عملة معدنية كتلتـها m رأسـيًا إلى أعلـى بسرعة ابتدائية قدرها v_0 . وعندما تصل القطعة المعدنية إلى أعلى نقطة فى المسار يصبح ارتفاعها $y = h$ وتصبح سرعتها النهائية $v_f = 0$. وحيث أن عجلة القطعة المعدنية أثناء الحركة تظل ثابتة ، $a = -g$ ، يمكننا باسـتخدام المعادلـة (9-2) ، $v_f^2 - v_0^2 = 2ay$ ، أن نحصل على :

$$0 - v_0^2 = -2gh$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى h سنجد أن $h = v_0^2/2g$. وبالتعويض عن h بهذه القيمة فى معادلة GPE لقطعة العملة عند أعلى نقطة فى مسار الحركة نجد أن :

$$\text{GPE} = mgh = mg\frac{v_0^2}{2g} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

هذا يبين أن **طاقة الجهد التثاقلى لجسم عند قمة مساره تساوى طاقة حركته عند قـاع المسار** ، هذا بفرض أن مقاومة الـهواء مهملة .

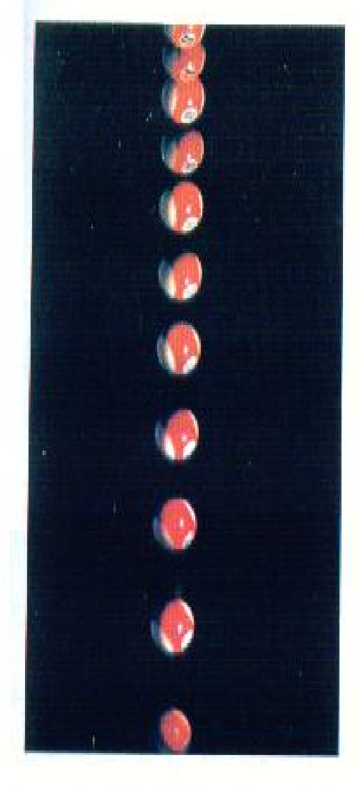
يتضح مما سبق أن طاقة الحركة الابتدائية تتحول إلى GPE أثناء ارتفاع قطعة العملة إلى أعلى . هذا التحول يحدث أيضًا عندما تسقط قطعة العملة سقوطًا حرًا فى الـهواء إذ تفقد قطعة العملة طاقة الجهد التثاقلى GPE ولكنـها تكتسب كميـة مكافئـة مـن طاقـة الحركة KE ، وهذا مثال لبقاء الطاقة الميكانيكية . فإذا كانت قوة الجاذبيـة هـى القـوة الوحيدة المؤثرة على الجسم ، يمكننا التعبير عـن بقـاء الطاقـة الميكانيكيـة رياضيًـا علـى الصورة :

$$\Delta \text{ME} = 0 = \Delta \text{KE} + \Delta \text{GPE}$$

إذن :

$$\Delta \text{KE} = -\Delta \text{GPE}$$

أما إذا وجدت قوى محافظة أخـرى فـإن التغيرات فـى طاقـات الجـهد المنـاظرة يمكـن التعبير عنها بنفس الطريقة تمامًا مثل ΔGPE .



نظرة أخرى إلى سقوط الأجسام تبين تحـول طاقة الجهد التثاقلى إلى طاقة حركة ــ كلمـا نقص ارتفاع الجسم قلت طاقة الجهد التثاقلى GPE وزادت سرعته .

5-9 قانون بقاء الطاقة

إذا ما تذكرنا أن الطاقة مرتبطة بالمقدرة على بذل الشغل سيتضح لنا أن هنـاك صـورًا عديدة أخرى للطاقة . فالفحم وزيت البترول والبنزين وغير ذلك من أنواع الوقود يحتوى على طاقة لأنها يـمكن أن تحترق احتراقًا كيميائيًا تتحول فيه بعض الطاقة المختزنة إلى

شغل ميكانيكي . وتعرف هذه الطاقة المختزنة **بالطاقة الكيميائية** . كذلك فإن بعض الأنوية الذرية يمكنها أن تنشق أو **تنشطر** في المفاعلات النووية محررة كمية كبيرة من الطاقة التي يمكن استغلالها في تشغيل التوربينات المولدة للكهرباء . وعليه فإن الأنوية تحتوي على طاقة تسمى **الطاقة النووية** . علاوة على ذلك فإن الشحنات الكهربائية يمكنها أن تبذل شغلاً ، أي أن الشحنات الكهربائية لها **طاقة كهربائية** . وأخيرًا وليس آخرًا يمكن أن تخزن الطاقة في الأجهزة المرنة ، فالزنبرك الممتد ووتر قوس الرماية له **طاقة جهد مرن** يمكن أن تتحول إلى طاقة حركة للكتلة المتصلة بالزنبرك أو السهم المنطلق من القوس .



طاقة وضع كرة هدم المبنى على وشك التحول إلى طاقة حركة .

تعتبر الطاقة المرتبطة بحركة ذرات وجزيئات المادة واحدة من أهم صور الطاقة . وبالرغم من أن حركة هذه الجزيئات تتضمن طاقة حركة الذرات المنفردة ، فإن الذرات تتحرك في اتجاهات عشوائية بسرعات مختلفة المقدار . هذا السلوك يختلف بالطبع عن حركة الجسم بأكمله حيث تتحرك جميع ذراته معًا بنفس سرعة الجسم ، ولهذا أمكن وصف طاقة حركة الجسم بدلالة كتلته ومقدار سرعته $(\frac{1}{2}mv^2)$. هذه الحركات العشوائية للذرات والجزيئات هي إحدى صور الطاقة التي تمثل خاصية داخلية للمادة تعرف باسم **الطاقة الحرارية** (TE) . هذا وترتبط كمية الطاقة الحرارية للجسم بدرجة حرارته ، ولكننا سنؤجل مناقشة هذه العلاقة بالتفصيل إلى فصول لاحقة من هذا الكتاب . أما الآن فيمكننا أن نتحقق من أن بذل الشغل على الجسم يؤدي إلى تغيير طاقته الحرارية .

فمثلاً ، إذا دفعت كتابك لينزلق على الأرضية سوف تختفي طاقة الحركة التي أمدت بها الكتاب عندما يصل الكتاب إلى السكون . ومع ذلك فإن الكتاب لم يكتسب GPE لأن الأرضية مستوية . ماذا حدث للطاقة الأصلية للكتاب عندما تركته يدك ؟ إن القوة الوحيدة المؤثرة على الكتاب في اتجاه الإزاحة هي قوة الاحتكاك الحركي ، وهي

تبذل شغلاً كما رأينا سابقًا . وقد علمتنا الخبرة أن الكتاب (والأرضية) « يسخنان » قليلاً عند وجود الاحتكاك . وهذه عادة هى الطريقة المعتادة للاستدلال على زيادة الطاقة الحرارية لهذه المواد . بناء على ذلك يمكننا الإجابة عن السؤال المتعلق بما حدث لطاقة الحركة KE الأصلية ؛ لقد تحولت عن طريق الشغل المبذول بواسطة قوى الاحتكاك إلى طاقة حرارية TE للكتاب والمنضدة . ويمكن التعبير عن هذه الحقيقة بأسلوب آخر وهو أن الشغل المبذول بالاحتكاك يظهر فى صورة زيادة فى TE .

$$-W_{fr} = \Delta \mathrm{TE}$$

والإشارة السالبة ضرورية هنا لأن W_{fr} سالب دائمًا ، بينما تزداد TE .

فى أى عملية فيزيائية توجد دائمًا تحولات لبعض صور الطاقة إلى صور أخرى ، وتخضع مثل هذه التحولات للقيد الآتى :

الطاقة لا تخلق ولا تفنى . فإذا حدث فقد فى إحدى صور الطاقة تحدث زيادة مساوية فى صور أخرى .

هذه العبارة تسمى قانون بقاء الطاقة . ويستمد هذا القانون صحته من حقيقة أن التجربة لم تدحضه على الإطلاق ، كما أنه يعتبر واحدًا من أقوى مبادئ الفيزياء وأكثرها عمومية . وأيضًا ، حيث أن الطاقة فى أى صورة من الصور توجد فى كل فروع الفيزياء ، فإن قانون البقاء هذا يعتبر واحدًا من أعم مبادئ التوحيد فى الفيزياء كلها .

ولكى تتحقق الاستفادة العملية من مفهوم بقاء الطاقة يجب علينا (1) فصل القوى المحافظة عن القوى غير المحافظة ، (2) تعريف النظام المطلوب حساب طاقته تعريفًا دقيقًا . وعلينا أن نتذكر فى هذا الصدد أن القوة المحافظة الوحيدة التى تعاملنا معها حتى الآن هى قوة الجاذبية . ولكننا سوف نقابل لاحقًا قوى محافظة أخرى نذكر منها القوى المرنة والقوى الكهربائية بين الشحنات . أما جميع القوى كالشد والدفع واللزوجة فهى قوى غير محافظة . وبدلالة القوى غير المحافظة يمكن كتابة قانون بقاء الطاقة كصورة موسعة لنظرية الشغل والطاقة السابق مناقشتها :

الشغل المبذول بواسطة القوى غير المحافظة الخارجية بالنسبة لنظام ما تساوى مجموع التغير فى طاقة الحركة والتغير فى طاقة الوضع والتغير فى الطاقة الحرارية .

$$W_{ext} = \Delta \mathrm{KE} + \Delta \mathrm{PE} + \Delta \mathrm{TE} \qquad (5\text{–}9)$$

مع ملاحظة أن ΔTE ناتجة عن الشغل المبذول بواسطة قوى الاحتكاك داخل النظام ، بما فى ذلك لزوجة الموائع ومقاومة الهواء .

هذه الصورة لنظرية الشغل والطاقة تأخذ فى الاعتبار كل تحولات الطاقة داخل وخارج النظام . فإذا بذل الشغل على النظام سوف يستهلك جزء منه فى تغيير حركة النظام ويستغل الجزء الآخر فى تغيير مواضع أجزاء النظام . ويدخل الجزء الأخير فى الحركة الجزيئية الداخلية (الحرارية) .

عندما لا تؤثر على النظام أى قوة غير محافظة سوف تأخذ المعادلة (9-5) الصورة :

$$\Delta KE + \Delta PE + \Delta TE = 0 \qquad (9-5أ)$$

وتنص هذه المعادلة على أن الزيادة فى الطاقة الحرارية للنظام تأتى على حساب النقص فى الطاقة الميكانيكية . وعندما يكون الاحتكاك مهملاً فإن $\Delta TE = 0$ ، وتكون الطاقة الميكانيكية محفوظة :

$$\Delta KE + \Delta PE = 0 \qquad (9-5ب)$$

المعادلة (9-5) إذن هى صيغة عامة جدًا تتضمن كل الحالات الخاصة . ومن الأهمية بمكان أن ندرك أن تأثير كل القوى المحافظة المؤثرة على النظام يؤخذ فى الاعتبار من خلال حد طاقة الوضع فى المعادلة (9-5) .



قوى الاحتكاك المؤثرة بواسطة مادة الهدف تسبب إيقاف الأسهم ، محولة طاقة حركتها إلى طاقة حرارية .

مثال 5-5

عندما كانت سيارة كتلتها 900 kg متحركة فى طريق أفقى بسرعة قدرها 20 m/s ضغط السائق على الفرامل فتزحلقت السيارة مسافة قدرها 30 m قبل أن تتوقف تمامًا . استخدم مفهومى الشغل والطاقة لإيجاد قوة الاحتكاك بين إطارات السيارة والطريق .

استدلال منطقى :

سؤال : يجب أن تنطبق نظرية الشغل والطاقة الموسعة على جميع الحالات . ما هو النظام الذى يهمنا هنا ؟

الإجابة : إذا اعتبرنا أن نظامنا مكون من السيارة والطريق يمكننا القول أن : $W_{ext} = 0$.

سؤال : كيف تدخل قوة الاحتكاك فى نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة : الشغل السالب المبذول بواسطة الاحتكاك يساوى الزيادة فى الطاقة الحرارية للطريق زائدًا الإطارات .

$$-W_{fr} = \Delta TE$$

سؤال : ما هى التغيرات التى حدثت فى صور الطاقة الأخرى ؟

الإجابة : GPE لم تتغير لأن السيارة تتحرك أفقيًا ، أما KE فتقل من قيمتها الابتدائية إلى الصفر .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من نظرية الشغل والطاقة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : $\Delta KE + \Delta TE = 0$ التى تصبح على الصورة :

$$(0 - \frac{1}{2}mv_0^2) + fs = 0$$

حيث $s = 30$ m . لاحظ أن $fs = -W_{fr}$.

الحل والمناقشة : بحل المعادلة السابقة بالنسبة إلى f :

$$f = \frac{mv_0^2}{2s} = \frac{(900\ \text{kg})(20\ \text{m/s})^2}{2(30\ \text{m})} = 6000\ \text{N}$$

تمرين : ما مقدار الطاقة الحرارية المتولدة فى الإطارات نتيجة الاحتكاك ؟

الإجابة : 180 kJ .

تمرين : ما قيمة معامل الاحتكاك الحركى بين الإطارات والطريق ؟

الإجابة : 0.68 .

مثال 5-6

سقطت كرة كتلتها 3.0 kg على الأرض من ارتفاع قدره 4.0 m . استخدم مفاهيم الطاقة لتعيين سرعة الكرة قبل اصطدامها بالأرض مباشرة . إهمل مقاومة الـهواء .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو النظام الذى يهمنا فى هذه المسالة ؟

الإجابة : الكرة فقط لأنها لا تتفاعل مع الـهواء أو الأرض .

سؤال : هل توجد حدود مساوية للصفر فى نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة : نعم ؛ $\Delta TE = 0$ عندما يمكن إهمال مقاومـة الـهواء . وأيضـا $W_{ext} = 0$ لأنـه لا يوجد أى قوى غير محافظة مؤثرة على النظام (الكرة) .

سؤال : ولكـن ، أليست الجاذبية قـوة خارجية بالنسبة للكرة . كيف يمكن أخذها فـى الاعتبار ؟

الإجابة : الجاذبية قوة محافظة ، وهى بالفعل مأخوذة فى الاعتبار من خلال حد طاقة الوضع PE فى نظرية الشغل والطاقة .

سؤال : ما هى المعادلة المحددة التى تعطيها نظرية الشغل والطاقة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : هذا مثال آخر لبقاء الطاقة الميكانيكية

$$\Delta KE + \Delta GPE = 0$$

الحل والمناقشة : إذا أخذنا سطح الأرض كمستوى إسناد لطاقة الجهد التثاقلى GPE ، عندئذ يكون :

$$\Delta KE = \frac{1}{2}mv^2 - 0 \quad \text{و} \quad \Delta GPE = 0 - mg(4.0\ \text{m})$$

هذا يعطى :

$$\frac{1}{2}mv^2 - mg(4.0\ \text{m}) = 0$$

لاحظ أن كتلة الكرة قد اختصرت فى الحدين . بالحل بالنسبة إلى v :

$$v_f = (2gh_0)^{1/2} = [2(9.8\ \text{m/s}^2)(4.0\ \text{m})]^{1/2} = 8.9\ \text{m/s}$$

مثال 5-7

سقط صندوق شحن كتلته 50 kg من سطح مبنى ارتفاعه عن الشارع 40 m ، وكانت سرعته لحظة ارتطامه بأرض الشارع 20 m/s . باستخدام مفاهيم الطاقة ، أوجد متوسط قوة مقاومة الهواء أثناء سقوط الصندوق .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يجب إدخال الهواء كجزء من النظام ؟

الإجابة : يمكن معالجة المسألة بإحدى طريقتين . إذا كان الهواء جزءًا من النظام سوف يظهر الشغل المبذول بواسطة مقاومة الهواء فى صورة حد موجب ΔTE فى نظرية الشغل والطاقة . وإذا كان صندوق الشحن وحده هو النظام فإن قوة مقاومة الهواء سوف تبذل شغلاً خارجيًا W_{ext} بالنسبة للنظام ، وهذه كمية سالبة من الشغل تظهر فى الطرف الأيسر لمعادلة الشغل والطاقة . والواقع أن كلتى الحالتين تمثلان نفس الشىء من الناحية الرياضية . المهم هو تعريف النظام بعناية ثم الالتزام به .

سؤال : سوف نعتبر أن الهواء جزء من النظام . ما قيمة التغير فى كل من حدود الطاقة فى معادلة الشغل والطاقة ؟

الإجابة : قوة مقاومة الهواء تبذل شغلاً خلال مسافة السقوط h ، وعليه :

$$\Delta TE = -W_{ft} = f_{air}(40\ m)$$

طاقة الحركة KE تزداد من 0 إلى $\frac{1}{2}m\,(20\ m/s)^2$ ، كما أن GPE تتغير بمقدار $mg(-40m)$.

سؤال : هل توجد أى قوى غير محافظة أخرى مؤثرة على النظام ؟

الإجابة : لا . لا يوجد أى مصدر آخر للاحتكاك ، كما لا توجد حبال خارجية أو قوى أخرى مؤثرة على صندوق الشحن .

سؤال : ما هى المعادلة الناتجة من تطبيق نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة :

$$0 = \frac{1}{2}m(20\ m/s)^2 - mg(40\ m) + f_{air}(40\ m)$$

تأكد من فهمك لإشارات كل هذه الحدود .

الحل والمناقشة : بحل المعادلة بالنسبة إلى f_{air} نحصل على :

$$f_{air} = mg - \frac{mv^2}{2h}$$

$$= (50\ kg)(9.8\ m/s^2) - \frac{(50\ kg)(20\ m/s)^2}{2(40\ m)}$$

$$= 240\ N$$

تمرين : احسب التغيرات فى كل من الحدود فى نظرية الشغل والطاقة فى المسألة السابقة .

الإجابة : $\Delta KE = +10{,}000\ J$, $\Delta TE = +9600\ J$ ، $\Delta GPE = -19{,}600\ J$.

أكوام الرمل الممتصة للطاقة فى الطرق الجبلية المنحدرة وخلفها شاحنة طوارئ .

مثال 5-8

تبدأ عربة من عربات الأفعوانية* حركتها من السكون عند النقطة A بالشكل 15-5 وتهبط تلقائيًا على القضبان . إذا كانت قوة الاحتكاك المعوقة N 20 فما سرعة العربة (أ) عند النقطة B ؟ (ب) عند النقطة C ؟

شكل 15-5 : تتحول طاقة الجهد التثاقلي للعربة عند A إلى طاقة حركة وطاقة حرارية متولدة نتيجة للاحتكاك عند وصول العربة إلى النقطة B ثم C .

استدلال منطقي (أ) :

سؤال : ما هي التغيرات التي تحدث في KE و GPE للعربة عندما تنتقل من A إلى B ؟

الإجابة : GPE تتغير بمقدار $mg\Delta h$ ، حيث $\Delta h = -10$ m . كذلك تتغير KE من 0 إلى $\frac{1}{2}mv_B^2$ ، حيث v_B هو المجهول المطلوب إيجاده .

سؤال : هل يجب إدخال القضبان كجزء من النظام ؟

الإجابة : لنا الحرية في أن نختار النظام كما نريد . كما فعلنا في المثال السابق ، طالما تؤخذ قوة الاحتكاك في الاعتبار بطريقة صحيحة .

سؤال : في هذه المرة نعتبر أن العربة وحدها هي النظام . أي حد في نظرية الشغل والطاقة يتضمن الاحتكاك ؟

الإجابة : إذا عاملنا الاحتكاك كقوة خارجية فإن $W_{ext} = -fs$ ، حيث $s = 40$ m وهي المسافة من A إلى B على القضبان .

سؤال : ما المعادلة التي نحصل عليها من نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة :
$$-fs = (\frac{1}{2}mv_B^2 - 0) + mg\,\Delta h$$

الحل والمناقشة : بحل المعادلة السابقة بالنسبة إلى v_B والتعويض بالقيم العددية :

$$v_B = [2(9.8\ \text{m/s}^2)(10\ \text{m}) - 2(20\ \text{N})(40\ \text{m})/(300\ \text{kg})]^{1/2}$$

استدلال منطقي (ب) :

سؤال : هل يجب أن نبدأ من A مرة ثانية حتى يمكن إيجاد v_C ؟

* الأفعوانية (Roller coaster) سكة حديد مرتفعة (في مدينة الملاهي) تتلوى وتنخفض وتجري فوق قضبانها عربات صغيرة (المترجم) .

الإجابة : يمكن أن نبدأ من A أو B مع استخدام الشروط عند أي منهما كشروط ابتدائية . فإذا اخترنا A كنقطة بداية فلن نحتاج إلى معرفة ما حدث عند B حتى يمكن الحل بالنسبة للنقطة C .

سؤال : ما مقدار التغير في GPE بين A و B ؟ وبين B و C ؟

الإجابة : $\Delta GPE = mg\,\Delta h$ ، حيث $\Delta h = -2m$ من A إلى C ؛ وبالمثل $\Delta h = +8\ m$ من B إلى C .

سؤال : ما مقدار الشغل المبذول بالاحتكاك بين A و B ؟ وبين B و C ؟

الإجابة : مرة ثانية W_{ext} يعتمد على طول المسار . وعليه فإن :

$W_{ext} = -(20\ N)(60\ m) = -1200\ J$ من A إلى C ،

وبالمثل : $W_{ext} = -(20\ N)(20\ m) = -400\ J$ من B إلى C .

سؤال : ما مقدار التغير في KE من A إلى C ومن B إلى C ؟

الإجابة : وجدنا أن العربة تتحرك بسرعة مقدارها 13.8 m/s عند النقطة B ، وهذه القيمة تمثل مقدار السرعة الابتدائية للقطعة $B - C$.

$$\Delta KE_{A\text{-}C} = \frac{1}{2}mv_C^2 - 0 \quad \text{و} \quad \Delta KE_{B\text{-}C} = \frac{1}{2}m[v_C^2 - (13.8\ m/s)^2]$$

الحل والمناقشة : بتطبيق نظرية الشغل والطاقة نحصل على المعادلتين :

$$A\text{-}C: \quad -1200\ J = \frac{1}{2}mv_C^2 + mg(-2\ m)$$

$$B\text{-}C: \quad -400\ J = \frac{1}{2}mv_C^2 - \frac{1}{2}m\,(13.8\ m/s)^2 + mg(8\ m)$$

يجب أن تكون قادرًا على إثبات أن $v_C = 5.6\ m/s$ في كلتا الحالتين .

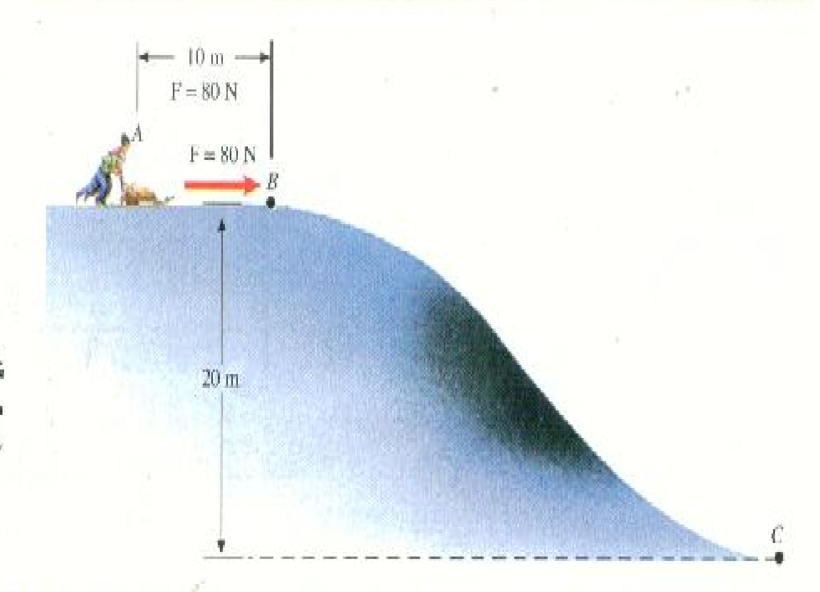
تأكد أنك تلاحظ أن ΔGPE يعتمد فقط على الفرق بين الوضعين الرأسيين للنقطتين A و B ، بينما W_{ext} (إذا أخذت القضبان كجزء من النظام) يعتمد على **المسافة الفعلية على طول المسار** من A إلى B . خلاصة القول أن تغيرات الطاقة نتيجة للقوى المحافظة تعتمد فقط على الموضعين الابتدائي والنهائي ، ولكن تغيرات الطاقة نتيجة للقوى غير المحافظة تعتمد على مسار الحركة الفعلي .

تمرين : ما مقدار سرعة حركة العربة عند النقطة C إذا كان مقدار سرعتها 5.0 m/s عند A بفرض إهمال قوى الاحتكاك ؟ **الإجابة :** 14.9 m/s .

مثال 5-9

ابتدأ طفلان في دفع مزلجة كتلتها 50 kg من السكون كما هو مبين بالشكل 16-5 ، وكانت القوة التي يؤثران بها 80 N أثناء دفعهما للمزلجة مسافة قدرها 10 m على القمة المستوية لتل مغطى بالثلج الأملس اللااحتكاكي . وعندما وصلت المزلجة إلى الحافة تركها الطفلان لتبدأ الهبوط وحدها على المنحدر . وفي طريقها إلى أسفل التل مرت

المزلجة على بعض الحصى الذى يغطى الثلج ، وعندما وصلت المزلجة إلى قاع المنحدر الذى ينخفض عن القمة مسافة رأسية قدرها 20 m كان مقدار سرعتها 14 m/s . ما مقدار الطاقة المتولدة نتيجة للاحتكاك مع الحصى ؟



شكل 16-5 :
ما مقدار الشغل المبذول بواسطة الاحتكاك على المزلجة بسبب الحصى ؟

1

استدلال منطقى :

سؤال : أعتقد أن الشغل المبذول بواسطة الاحتكاك يعتمد علي مسار الحركة ، ولكن المسار غير معلوم هنا . كيف يمكن الحل بدون ذلك ؟

الإجابة : هذه العبارة صحيحة فى حالة استخدامنا **لتعريف الشغل** . لكننا نعلم مع ذلك أن الطاقة الكلية محفوظة . فإذا أخذت الأرض كجزء من النظام فإن الشغل المبذول بواسطة الاحتكاك سوف يظهر فى صورة TE ، وهو المطلوب إيجاده .

سؤال : هل يجب إيجاد مقدار سرعة المزلجة عند B أم يمكن استخدام النقطتين A و C باعتبارهما نقطتى البداية والنهاية ؟

الإجابة : يمكن إيجاد مقدار السرعة عند B ، ولكن قانون بقاء الطاقة صحيح دائمًا بين أى نقطتين ، وبذلك تكون النقطتان A و C الطريق المباشر إلى الإجابة .

سؤال : ما مقدار التغير فى KE بين A و C ؟

الإجابة : $\text{KE} = 0$ عند A ؛ $\text{KE} = \frac{1}{2}m(14\text{ m/s})^2$ عند C .

سؤال : ما قيمة التغير فى PE بين A و C ؟

الإجابة : $\Delta\text{PE} = mg(-20\text{m})$.

سؤال : ما قيمة ΔTE ؟

الإجابة : ΔTE هى المجهول المطلوب تعيينه .

سؤال : هل تبذل أى قوى غير محافظة شغلاً على النظام ؟

الإجابة : نعم . الشغل المبذول بواسطة الطفلين بين A و B ، فهما يمثلان عاملاً خارجيًا بالنسبة للنظام المكون من المزلجة والتل ، ويؤثران بقوة غير محافظة تبذل كمية من الشغل قدرها $W_{ext} = (80\text{ n})(10\text{ m}) = +800\text{ J}$.

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها عند تطبيق نظرية الشغل والطاقة بين A و C ؟

الإجابة : $+800\ \text{J} = \frac{1}{2}m(14\ \text{m/s})^2 + mg(-20\ \text{m}) + \Delta\text{TE}$

الحل والمناقشة : بحل المعادلة السابقة بالنسبة إلى ΔTE نحصل على :

$$\Delta\text{TE} = 800\ \text{J} - \frac{1}{2}(50\ \text{kg})(14\ \text{m/s})^2 + (50\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(20\ \text{m})$$

$$= 5700\ \text{J}$$

بالنظر إلى كل حد على حدة سنجد أن الطفلين يعطيان المزلجة 800 J من طاقة الحركة ويضاف إلى ذلك 9800 J نتيجة لتأثير الجاذبية أثناء الهبوط ، ويستهلك الاحتكاك 5700 J فيتبقى بعد ذلك 4900 J فى صورة KE عند القاع . هذا يعنى أن مقدار سرعة الجسم ، وكتلته 50 kg ، عند القاع تساوى 14 m/s لاحظ مرة ثانية أن الطاقة محفوظة .

مثال 5-10

سقطت كرة كتلتها 2.000 kg من ارتفاع قدره 10.00 m فى صندوق ملىء بالرمل كما هو مبين بالشكل 17-5 فوصلت إلى السكون على بعد قدره 3.00 m تحت سطح الرمل . ما القيمة المتوسطة للقوة التى يؤثر بها الرمل على الكرة ؟



شكل 17-5 :
استهلكت طاقة الجهد التثاقلى للكرة عند A فى بذل شغل احتكاكى على الرمل خلال الزمن الذى استغرقته الكرة للوصول إلى السكون عند النقطة C .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يتضمن القوة المتوسطة التى يؤثر بها الرمل على الكرة ؟

الإجابة : إذا اعتبرنا أن نظامنا يتكون من الكرة والرمل ، فإن نظرية الشغل والطاقة تحتوى على الحد الآتى :

$$\Delta\text{TE} = f_{\text{sand}}\,(0.030\ \text{m})$$

سؤال : فى أى مستوى يمكن اعتبار PE صفرًا ، عند A أم B أو C ؟

الإجابة : يمكن اختيار مستوى أى نقطة منها ، ولكن حيث أن معرفة مقدار السرعة عند B غير ضرورى ، فإن مستوى B سيكون اختيارًا ملائمًا .

سؤال : إذا أخذنا A كنقطة إسناد ، فماذا ستكون قيمة كل من ΔKE و ΔGPE بين النقطتين A و C ؟

الإجابة : الكرة تكون ساكنة عند كلتا النقطتين ، وعليه فإن $\Delta\text{KE} = 0$. وحيث أن نظرية الشغل والطاقة تظل صحيحة بين أى نقطتين فى المسار فإن

$$\Delta\,\text{GPE} = mg(h_C - h_A) = mg(-10.03\ \text{m})$$

سؤال : ما قيمة W_{ext} ؟

الإجابة : $W_{\text{ext}} = 0$ لأننا اعتبرنا أن الرمل جزء من نظامنا .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة : $\Delta GPE + \Delta TE = 0$ حيث $\Delta TE = -W_{fr}$.

الحل والمناقشة : فى هذه الحالة تتحول GPE الابتدائية كلها إلى طاقة حرارية للكرة والرمل لأن $\Delta KE = 0$.

$$\Delta TE = -\Delta GPE = (2.000\ kg)(9.800\ m/s^2)(10.03\ m) = 196.6\ J$$

إذن :

$$f_{sand} = \frac{196.6\ J}{0.030\ m} = 6550\ N$$

مثال 5-11

البندول عبارة عن كرة معلقة فى طرف خيط كما هو مبين بالشكل 18-5أ . إذا بدأت الكرة حركتها من السكون عند النقطة A ، فما مقدار سرعة الكرة (أ) عند B ؟ (ب) عند C ؟ إهمل الاحتكاك الهوائى وأى احتكاك عند نقطة تعليق البندول .

استدلال منطقى :

سؤال : هل تتولد أى طاقة حرارية ؟

الإجابة : لا ، لأن الاحتكاك عند نقطة التعليق وكذلك الاحتكاك الهوائى يمكن إهمالهما . ومن ثم لن نتعامل مع الطاقة الحرارية فى هذه المسألة .

سؤال : هل يبذل أى شغل خارجى على الكرة ؟

الإجابة : لا ، فالقوة الوحيدة المؤثرة على الكرة خلاف قوة الجاذبية هى الشد فى الخيط . ومن الواضح أن هذا الشد عمودى دائمًا على اتجاه حركة الكرة ، ولذلك فإنها لا تبذل شغلاً .

سؤال : ما شكل نظرية الشغل والطاقة هنا ؟

الإجابة : $\Delta KE + \Delta PE = 0$.

سؤال : ما مقدار ΔPE بين A و B ؟ وبين A و C ؟

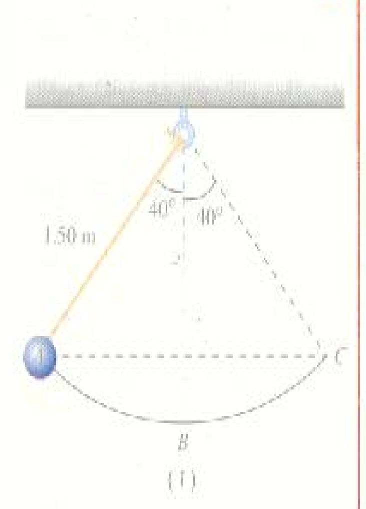
الإجابة : النقطتان A و C تقعان على نفس المستوى ، ومن ثم $\Delta PE_{A-C} = 0$. وكما هو واضح من الشكل 19-5ب ، تقع النقطة B على بعد قدره $(1.50\ m)\ \cos 40° = 1.15\ m$ تحت نقطة التعليق مباشرة . إذن ، النقطة B تقع أسفل النقطة A بمسافة قدرها $1.5\ m - 1.15\ m = 0.35\ m$ ، وعليه ، $\Delta PE_{A-B} = mg(-0.35\ m)$.

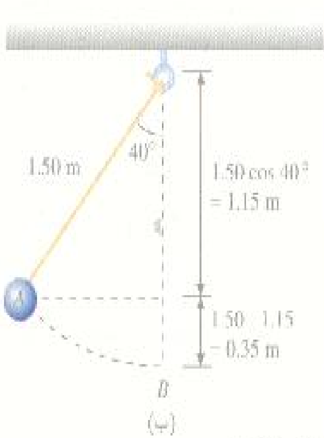
سؤال : ما هما المعادلتان اللتان نحصل عليهما من نظرية الشغل والطاقة ويمكن استخدامهما لتعيين v_B و v_C ؟

الإجابة : حيث أن $\Delta PE_{A-C} = 0$ ، إذن لن يحدث تغير فى KE ، وعليه فإن $v_C = 0$.

إذن ، بالنسبة إلى المسار $A-B$:

$$(\frac{1}{2}mv_B^2 - 0) + mg(-0.35m) = 0$$





شكل 18-5 :
عندما يتأرجح البندول ذهابًا وإيابًا تتحول طاقة الحركة إلى طاقة وضع وبالعكس .

الحل والمناقشة : من المعادلة السابقة نجد أن :

$$v_B = [2(9.8\ m/s^2)(0.35\ m)]^{1/2} = 2.62\ m/s$$

هذا مثال للتذبذب الدائم ، أو تحول طاقة الحركة إلى طاقة وضع وبالعكس عند غياب الاحتكاك أو أى قوى خارجية . كذلك يوضح هذا المثال بصورة مباشرة معنى القوة المحافظة فى مقابل القوة المولدة للحرارة (غير المحافظة) والتى تسبب تضاؤل الحركة مع الزمن .

مثال 5-12

الاحتكاك الاستاتيكى بين إطارات السيارة والطريق هو الذى يمكن السيارة من التسارع عندما يسلط المحرك عزم ازدواج على عجلتها . لنفرض أن السيارة الموضحة بالشكل 5-19 ، وكتلتها 2000 kg يمكنها التسارع من الصفر إلى 15.0 m/s على طريق مستو . فإذا كان متوسط القوة المعوقة للحركة نتيجة للاحتكاك بالهواء والاحتكاك فى كراسى التحميل خلال هذه الفترة الزمنية 500 N ، (أ) ما متوسط القوة التى يجب أن يؤثر بها الطريق على السيارة حتى تكتسب هذا التسارع ؟ (ب) ما القدرة المتوسطة التى تنتجها هذه القوة إذا كانت عجلة السيارة ثابتة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما مكونات النظام الذى يهمنا فى هذه الحالة ؟

الإجابة : السيارة والهواء . وعليه فإن القوى المولدة للحرارة ، ومجموعها 500 N ، هى قوى داخلية ، وهى المسئولة عن ΔTE .

سؤال : ماذا عن الاحتكاك الاستاتيكى بين الإطارات والطريق ؟

الإجابة : الاحتكاك الاستاتيكى لا يولد حرارة ، ذلك أن قطعة الإطار الملامسة للطريق لا تنزلق على سطح الطريق ، وبدوران الإطار سوف تحل محلها قطعة جديدة أثناء حركة السيارة . وإذا عاملنا الطريق باعتباره خارج النظام يمكن تعيين الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك الاستاتيكى عند نقطة التلامس . وسوف يظهر هذا الشغل فى صورة W_{ext} فى نظرية الشغل والطاقة .

سؤال : ما التغيرات التى تحدث فى صور الطاقة الأخرى ؟

الإجابة : GPE لا تتغير لأن الطريق مستوى .

$$\Delta KE = \frac{1}{2}(2000\ kg)(15.0\ m/s)^2 - 0 \quad \text{و} \quad \Delta TE = (500\ N)(80\ m)$$

سؤال : ماذا تعطينا نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة :

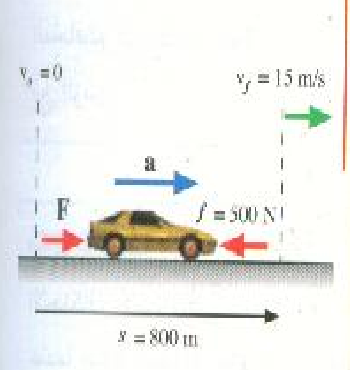
$$W_{ext} = F(80\ m) = \Delta KE + \Delta TE$$

سؤال : بالنسبة للجزء (أ) : ما علاقة القدرة المتولدة بالقوة المولدة لها ؟

الإجابة : القدرة هى الطاقة لوحدة الزمن ، أو معدل توليد الطاقة . والقدرة المتولدة فى هذه الحالة تساوى الشغل المبذول بواسطة القوة F مقسومة على الزمن اللازم لقطع المسافة 80 m .

سؤال : بماذا يتعين هذا الزمن ؟

الإجابة : يفترض أن العجلة ثابتة ، وعليه يمكن تطبيق معادلات الحركة ذات العجلة المنتظمة هذه المعادلات على وجه التحديد $s = \bar{v}t$ حيث $s = 80$ m وأيضًا $\bar{v} = \frac{v}{2} = 7.5$ m/s



شكل 5-19 :
ما مقدار القوة المسئولة عن العجلة ؟

الحل والمناقشة الجزء (أ) :

من معادلة الشغل والطاقة :

$$W_{ext} = 225,000 \text{ J} + 40,000 \text{ J} = 265,000 \text{ J}$$

الحد الأول يمثل الزيادة فى KE ، بينما يمثل الحد الثانى الطاقة الحرارية المتولدة بواسطة الاحتكاك الهوائى والاحتكاك داخل السيارة . ويمكن إيجاد القوة F المؤثرة عند مساحات التلامس بين الطريق والإطارات من العلاقة :

$$W_{ext} = F(80 \text{ m}) = 265,000 \text{ J}$$

إذن :

$$F = 3310 \text{ N}$$

الحل والمناقشة الجزء (ب) :

الزمن اللازم لقطع المسافة 80 m هو :

$$t = \frac{s}{v/2} = \frac{80 \text{ m}}{7.5 \text{ m/s}} = 10.7 \text{ s}$$

القدرة المتوسطة المتولدة بواسطة القوة F هو :

$$\bar{P} = \frac{W_{ext}}{t} = \frac{265,000 \text{ J}}{10.7 \text{ s}} = 24,800 \text{ W} = 33.2 \text{ hp}$$

تذكر أن هذه القدرة **المتوسطة** . وحيث أن $P = Fv$ فإن القدرة المستهلكة تزيد بزيادة السرعة .

من المعلوم أن حوالى 25 فى المائة من قدرة محرك السيارة يتحول إلى طاقة حركة ، ومن ثم فإن المحرك يجب أن يكون قادرًا على توليد 4(28.8 hp) = 115 hp على الأقل لتحقيق الحركة السابق وصفها .

5-10 الآلات البسيطة

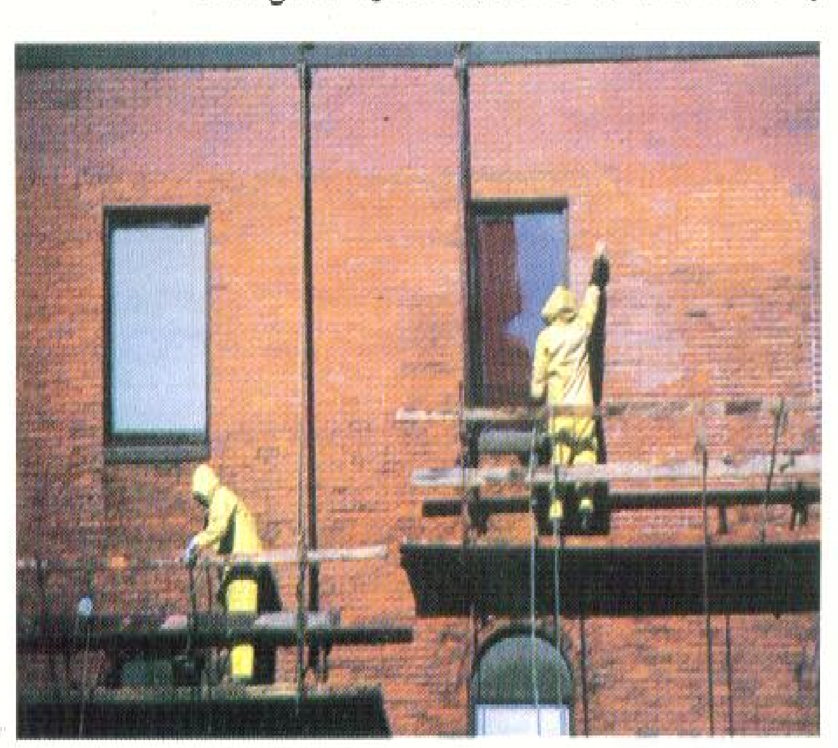
الآلات هى أجهزة تستخدم لمساعدتنا فى بذل الشغل . **والآلة البسيطة** هى جهاز ميكانيكى يمكنه أن يؤثر على جسم بقوة معينة فى نقطة معينة عندما تؤثر على الجهاز قوة

خارجية فى نقطة أخرى . وتمثل الروافع والبكرات والعجلة ذات المحور (الدنجل) والمرفاع بعض أمثلة الآلات البسيطة .

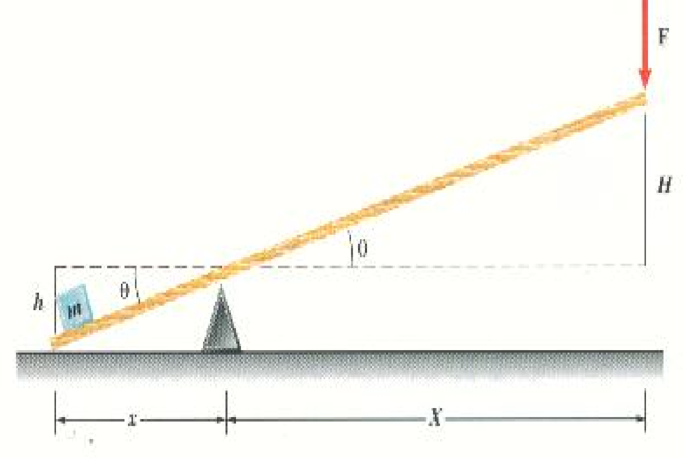
الآلات البسيطة لا تخلق الطاقة . فطبقًا لقانون بقاء الطاقة لا تستطيع الآلة أن تعطى خرج شغل أكبر من كمية الشغل التى تزود به . ونظرًا لأن الآلات لا تخلو دائمًا من بعض الاحتكاك فإن خرج الشغل يكون فى الحقيقة أقل من دخل الشغل بكمية تساوى الطاقة الحرارية المتولدة . وتعتبر **كفاءة الآلة** مقياسًا لدرجة تحويل دخل الشغل إلى خرج الشغل .

$$\text{الكفاءة \%} = \frac{\text{خرج الشغل}}{\text{دخل الشغل}} \times 100 \qquad (5\text{-}10)$$

ويقال أن الآلة **مثالية** إذا كانت تعمل بكفاءة قدرها 100 فى المائة .



يستخدم عمال نظافة الشبابيك أنظمة البكرات لرفع وخفض السقالات .



شكل 20–5 :
رافعة بسيطة .

وبالرغم من أن الآلة لا تستطيع أن تخلق الطاقة فإنها تستطيع تكبير دخل القوة ، وهذه فى الواقع هى فائدتها الأساسية . لنتأمل الرافعة البسيطة المبينة بالشكل 20–5 ؛

ولنفرض أن الاحتكاك فى محور ، أو المرتكز ، مهمل بحيث تكون الآلة مثالية . عند تسليط القوة F على بعد H يكون دخل الشغل :

$$FH = \text{دخل الشغل}$$

نتيجة لذلك سوف يرتفع الثقل mg ، ويسمى الحمل ، مسافة قدرها h ، ومن ثم يكون خرج الشغل :

$$mgh = \text{خرج الشغل}$$

وحيث أننا افترضنا أن الآلة مثالية ، إذن

$$\text{خرج الشغل} = \text{دخل الشغل}$$

أو :

$$FH = mgh$$

يلاحظ من الشكل 20–5 أن المثلثين المظللين على الجانبين الأيمن والأيسر لنقطة الارتكاز متشابهان ، وعليه فإن $h/H = x/X$. إذن :

$$F = mg\frac{h}{H} = mg\frac{x}{X}$$

ومن هذه المعادلة نرى أن القوة اللازمة لرفع الحمل F أقل من mg بنسبة قدرها x/X . فمثلاً ، إذا كانت $x = \frac{1}{2}X$ فإن F ستكون $\frac{1}{2}mg$ فقط . هذا يعنى أن الرافعة قد ضاعفت دخل القوة بمعامل قدره 2 .

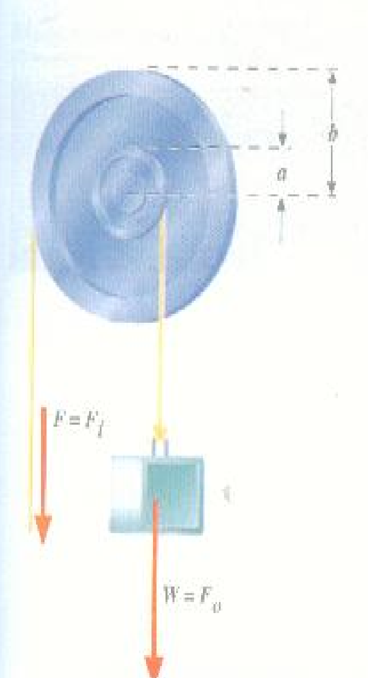
الآلات البسيطة يمكنها مضاعفة القوة المسلطة عليها .

تسمى قدرة الآلة البسيطة على مضاعفة القوى **بالفائدة الميكانيكية** . فإذا كانت F_0 هى خرج القوة للآلة وكانت F_i القوة المؤثرة عليها (أى دخل القوة) ، يمكن كتابة تعريف الفائدة الميكانيكية الفعلية AMA على الصورة :

$$(\text{AMA}) = \frac{F_0}{F_i} \tag{5-11}$$

وعلى سبيل المثال : يحتاج مرفاع السيارة إلى دخل قوة قدره 100 N لرفع حمل قدره 5000 N ، ومن ثم فإن AMA للمرفاع :

$$\text{AMA} = \frac{F_0}{F_i} = \frac{5000\ \text{N}}{100\ \text{N}} = 50$$



شكل 21–5 : IMA للعجلة ومحور العجلة (الدنجل) يساوى نسبة نصف قطر العجلة إلى نصف قطر محور العجلة .

يتلخص الثمن الذى ندفعه لمضاعفة قوة باستخدام آلة بسيطة فى أن المسافة التى يتحركها الحمل أقصر من المسافة التى تؤثر القوة المسلطة خلالها . فلكى يتحرك حمل مسافة قدرها y فى حالة الرافعة السابق وصفها يجب أن تؤثر قوة قدرها $\frac{1}{2}mg$ خلال

مسافة قدرها $2y$. هذا الفرق في المسافة هو مجرد نتيجة لبقاء الطاقة . إذن ، في حالة الآلة المثالية :

$$F_i s_i = F_0 s_0 \qquad \text{(للآلة المثالية فقط)}$$

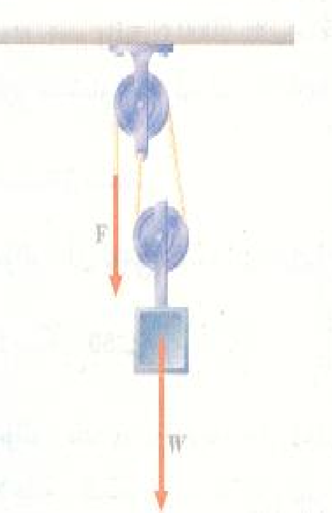
حيث s_i المسافة التي تؤثر خلالها القوة المسلطة ، s_0 المسافة التي يتحركها الحمل .

يمكن التعبير عن الكفاءة الميكانيكية لآلة مثالية بالنسبة بين خرج الإزاحة ودخل الإزاحة .

$$\text{الفائدة الميكانيكية المثالية} \quad (\text{IMA}) = \frac{s_i}{s_0} \qquad (5\text{-}12)$$

وباستخدام تعريفي AMA و IMA يمكن كتابة كفاءة الآلة على الصورة :

$$\text{الكفاءة} \ \% = \frac{\text{AMA}}{\text{IMA}} \times 100 \qquad (5\text{-}13)$$



شكل 22-5 :
IMA لهذه البكارة يساوي 2 .

سنقوم الآن بتوضيح فائدة هذه المعادلات بالرجوع إلى الآلة البسيطة الموضحة بالشكل 21-5 . هذه الآلة تسمى العجلة (الدنجل) ومحور العجلة وهي تستخدم لرفع حمل ثقيل W باستعمال دخل قوة صغير . ويمكن حساب IMA للآلة بملاحظة أنه عندما تدور العجلة ومحور العجلة دورة كاملة سوف يلتف من أحد الحبلين وينفك من الآخر طول يساوي محيط الدائرة المناظرة ، ومن ثم فإن $s_i = 2\pi b$ ، $s_0 = 2\pi a$. إذن :

$$\text{IMA} = \frac{s_i}{s_0} = \frac{2\pi b}{2\pi a} = \frac{b}{a}$$

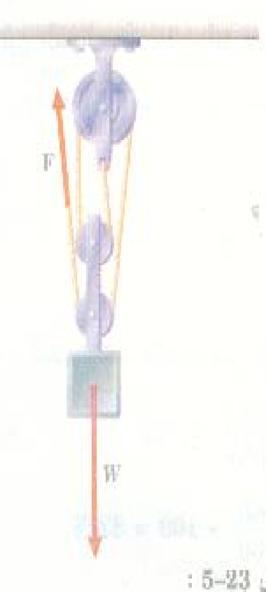
وإذا كانت كفاءة الآلة 100 في المائة فإن القوة F يمكنها أن ترفع حملاً وزنه :

$$W = \frac{b}{a} F$$

وبجعل نصف قطر العجلة أكبر كثيرًا من نصف قطر محور العجلة فإننا نحصل على جهاز ذي كفاءة رفع عالية جدًا .

تعتبر البكارات أيضًا آلات بسيطة هامة . والبكارة الموضحة بالشكل 22-5 تستطيع رفع جسم وزنه M عندما يشد الحبل المار على البكرة العلوية بقوة F . هذه البكرة مثبتة في السقف ، بينما تتحرك البكرة السفلى إلى أسفل عند شد الحبل بالقوة F . لاحظ أن البكرة السفلى سوف تتحرك مسافة قدرها $0.5\,s_i$ عندما يشد الحبل مسافة قدرها s_i على البكرة العليا . (يقصر كل من الحبلين اللذين يحملان البكرة السفلى بمقدار $0.5 \; s_i$ ، وبذلك يكون النقص الكلي في طول الحبل بين البكرتين s_i) ، ومن ثم :

$$\text{IMA} = \frac{s_i}{s_0} = \frac{s_i}{0.5 s_i} = 2.00$$



شكل 23-5 :
IMA للبكارة يساوي 4 .

هذه البكارة لـها IMA قدره 2 . يجب أن تكون قادرًا على إثبات أن الفائدة الميكانيكيـة للبكارة الموضحة بالشكل 23–5 تساوى 4 .

من الجدير بالذكر أن الفائدة الميكانيكية الفعلية لـهاتين البكارتين أقل كثيرًا مـن الفائدة الميكانيكية المثالية لـهما . هـذا ليس بسبب الاحتكاك الموجود فـى البكارتين فقط ، ولكن أيضًا لأن البكارتين ترفعان أيضًا حملاً إضافيًا غير نافع هو وزن البكـرة المتحركة . وبالرغم من ذلـك فـإن البكـارات تـستخدم علـى نطاق واسـع فـى رفـع الأجسام الثقيلة .

مثال 13-5 :

لـرفع جسم وزنـه 2000 N بالاستعانة بالبكارة (منظومة بكرات) الموضحة بالشكل 24–5 يلزم استخدام دخل قوة قدره 800 N . أوجد IMA و AMA وكفاءة هذه البكارة .

استدلال منطقى :

سؤال : أى نوعى الفائدة الميكانيكية يتضمن دخل وخرج القوة ؟

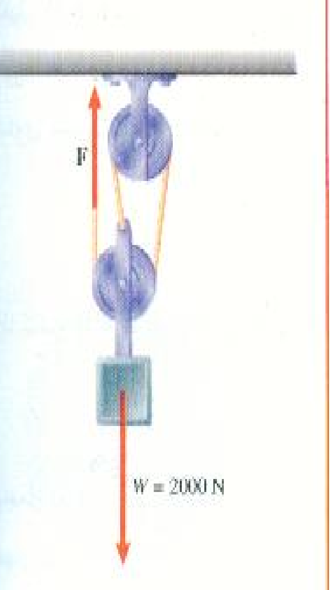
الإجابة : $AMA = \frac{F_0}{F_i} = \frac{2000\ N}{800\ N} = 2.50$

سؤال : ماذا يجب معرفته حتى يمكن حساب IMA ؟

الإجابة : النسبة بين المسافة التى تؤثر القوة المسلطة خلالـها والمسافة التى يتحركها الحمل .

سؤال : كيف نعرف مقدار الحمل المرفوع عند شد الطرف الحر للحبل ؟

الإجابة : فى أى رسم تخطيطى كهذا علينا عد عدد الحبال المشتركة فى رفع الحمل ؛ أى الحبال المؤثرة بشد الحمل إلى أعلى . وعندئذ تقسم أى إزاحة للطرف الحر للحبل بالتساوى بين هذا العدد من الحبال المشتركة فى الرفع . ففى الشكل 23–5 مثلاً تقسم القوة بين الحبال الأربعة . أما هنا ، فى الشكل 24–5 ، فهناك ثلاثة حبال تشـد إلى أعلى ؛ وعليه فإن المسافة التى يتحركها الحمل تساوى ثلث المسـافة التى تتحركـها F . إذن :



شكل 24–5 :
ما قيمة IMA لهذه البكارة ؟

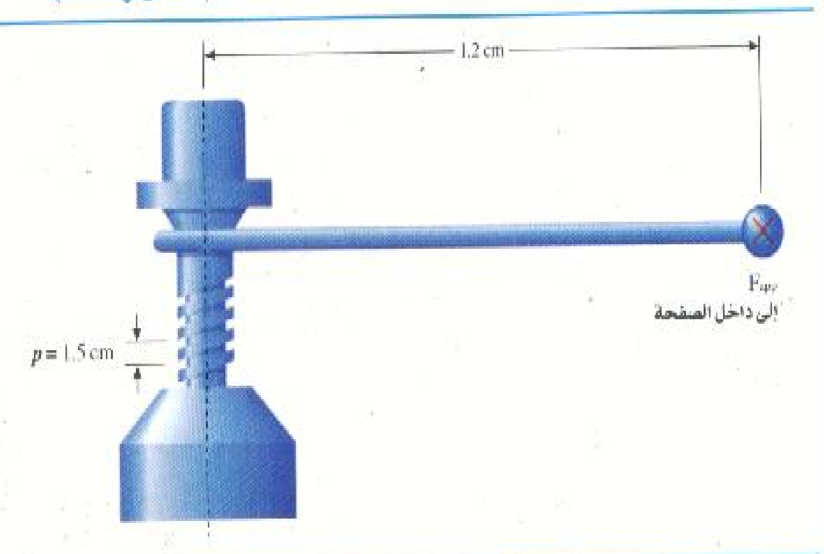
$$IMA = \frac{s_0}{s_i} = \frac{3s_0}{s_0} = 3.00$$

سؤال : كيف تعتمد الكفاءة على الفائدتين الميكانيكيتين ؟

الإجابة :

$$\text{الكفاءة}\ \% = \frac{AMA}{IMA} \times 100$$

$$= \frac{2.50}{3.00} \times 100 = 83\ \%$$



شكل 25-5 :
مرفاع السيارة .

مثال 14-5 :

يستخدم مرفاع السيارة المبين بالشكل 25-5 لرفع حمل مقداره 15,000 N وتدور يد المرفاع ، وطولها 1.2 m ، في دائرة أفقية عمودية على مستوى الصفحة ، وتبين العلامة × الموضحة في طرف اليد أن هناك قوة مسلطة عند هذا الموضع اتجاهها عمودي على مستوى الصفحة إلى الداخل . (أ) إذا كانت AMA لهذه الآلة 125 عندما تؤثر القوة عند طرف اليد ، فما مقدار القوة اللازمة لرفع الحمل ؟ (ب) إذا علمت أن خطوة اللولب ، وهي المسافة الرأسية بين سنين متتاليين ، 1.5 cm ، ما قيمة IMA ؟ (جـ) ما مقدار الطاقة الحرارية المتولدة عند ارتفاع الحمل مسافة رأسية قدرها 30 cm ؟

استدلال منطقي الجزء (أ) :

سؤال : كيف ترتبط القوة المستخدمة بالحمل و AMA ؟

الإجابة :
$$AMA = 125 = \frac{\text{الحمل}}{\text{القوة المستخدمة}}$$

الحل والمناقشة : الحل سهل :

$$\text{القوة المسلطة} = \frac{\text{الحمل}}{125} = \frac{15,000\ N}{125} = 120\ N$$

لاحظ أن المسألة تنص على أن القوة مسلطة تؤثر عند طرف اليد . أما إذا أثرت القوة في نقطة أخرى على اليد سوف يختلف ذراع الرافعة حول محور الدوران ، وبالتالي ستختلف قيمة القوة اللازمة لتحريك الحمل كما ستختلف AMA أيضًا . معنى ذلك أن AMA للآلة يعتمد على تفاصيل كيفية استعمال الآلة .

استدلال منطقي الجزء (ب) :

سؤال : ما علاقة IMA بخطوة اللولب ؟

الإجابة : IMA هي النسبة بين المسافة التي يؤثر خلالها دخل القوة والمسافة التي

يقطعها الحمل . ومعنى أن خطوة اللولب 1.5 cm هو أن الحمل يرتفع 1.5 cm كلما دارت اليد دورة كاملة . من المهم أيضًا أن يلاحظ أن دخل القوة يؤثر خلال مسافة قدرها طول محيط دائرة نصف قطرها 1.2 m عندما تدور اليد دورة كاملة .

هذه الإجابات تفيد أن $s_i = 2\pi(1.2\ m) = 7.54\ m$ لكل إزاحة رأسية للحمل إلى أعلى قدرها $s_o = 1.5 \times 10^{-2}\ m$ إذن :

$$IMA = \frac{7.54\ m}{1.5 \times 10^{-2}\ m} = 500$$

استدلال منطقى الجزء (جـ) :

سؤال : نظرية الشغل والطاقة تحتوى على ΔTE . كيف تنطبق النظرية على هذه الحالة ؟

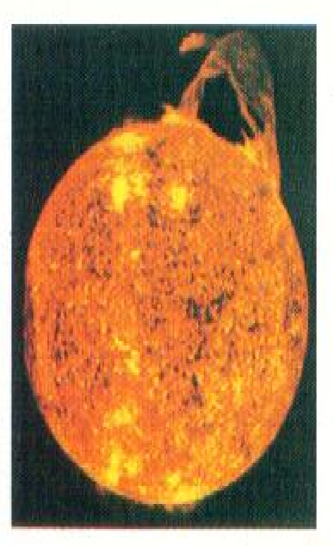
الإجابة : الشغل المبذول بواسطة دخل القوة هو $W_{ext} = F_i\ s_i$ ، وهذا يمكن حسابه لكل دورة من دورات اللولب . وحيث أن الحمل يكون ساكنًا فى بداية ونهاية الحركة ، إذن $\Delta KE = 0$. علاوة على ذلك تزداد GPE فى كل دورة بمقدار $\Delta GPE = (15,000\ N)\ s_o$. هكذا يتبين لنا أن ΔTE هو الحد المجهول الوحيد فى نظرية الشغل والطاقة .

الحل والمناقشة : نعلم أن $W_{ext} = (120\ N)(7.54\ m) = 905\ J$ لكل دورة . وهكذا سوف تتخذ نظرية الشغل والطاقة الشكل الآتى :

$$905\ J = 225\ J + \Delta TE \qquad \text{(لكل دورة)}$$

هذه المعادلة تعطى $\Delta TE = 680\ J$ لكل دورة ، ومن ثم فإن $\Delta TE = 13,600\ J$ للعشرين دورة التى تمثل إزاحة رأسية للحمل قدرها 30 cm .

5-11 وجهة نظر حديثة : تكافؤ الكتلة والطاقة



تتولد الطاقة التى تشعها الشمس نتيجة لتحول الكتلة إلى طاقة خلال الاندماج النووى الذى يحدث فى أعماق قلب الشمس .

فى أوائل هذا القرن توصل ألبرت أينشتين إلى المعادلة $E = mc^2$ أثناء بلورة نظرية النسبية . ومن بين كل معادلات الفيزياء ربما كانت هذه المعادلة أكثرها بساطة ومن ثم أكثرها شهرة بين عامة الناس . ولكن ماذا تعنى هذه العبارة البسيطة والعميقة فى آن واحد ؟

أولاً وقبل كل شيء علمنا فى القسم 12-3 أن c ترمز لسرعة الضوء وتساوى $3 \times 10^8\ m/s$ ، وهذا عدد كبير جدًا ويزداد كبرًا عند تربيعه . أما الرمز m فيمثل كتلة جسم أو مجموعة من الأجسام ، بينما يرمز الحرف E إلى كمية الطاقة . تقول العبارة $E = mc^2$ أن هناك طاقة تسمى الطاقة الكتلية مرتبطة بوجود المادة . فمثلاً ، كمية الطاقة التى تمتلكها كتلة قدرها 1 kg هى :

$$E = (1\ kg)(3 \times 10^8\ m/s)^2 = 9 \times 10^{16}\ J$$

ومع ذلك فإن إجراء هذه العملية الحسابية لا يعطى أى فكرة متعمقة عن صورة هذه الطاقة أو كيفية تفسير هذه المعادلة .

قد يكون من المفيد في هذا الشأن النظر بإمعان إلى تركيب المادة . تتكون المواد التى نتعامل معها فى حياتنا اليومية من ذرات مختلف العناصر الكيميائية المترابطة مع بعضها البعض فى صورة جزيئات بقوى كهرومغناطيسية ، ويمكن أن تتغير البنية الجزيئية للمادة نتيجة للتفاعلات الكيميائية كالاحتراق مثلاً . وعند ترتيب الذرات على هيئة جزيئات تبذل قوى الترابط شغلاً وهذا يؤدى إلى تغير طاقة جهد النظام . تذكر أن طاقة الجهد تنشأ نتيجة لمواضع أو هيئة الأجسام المتفاعلة . وعليه فإن التغير فى البنية الجزيئية هو تغير فى الهيئة ، ويمثل بالتالى تغيرًا فى طاقة جهد الجزئ ، وهو ما يسمى **طاقة الارتباط** .

عندما تكون الذرات فى البنية الجزيئية الجديدة أشد ترابطاً مما كانت قبل إعادة توزيعها تقل طاقة جهد النظام ، وتنبعث الطاقة من النظام فى صورة حرارة أو ضوء عادة . أما إذا كان التفاعل ينتج جزيئات جديدة ذات ذرات أقل ترابطاً فإن النظام لابد أن يكتسب بعض الطاقة ، ربما فى صورة حرارة .

تعنى معادلة أينشتين التى تربط الكتلة بالطاقة أن التغيرات فى طاقة النظام يصحبها تغيرات فى كتلة النظام ، ويمكن كتابة المعادلة $E = mc^2$ فى الصورة البديلة الآتية :

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \qquad (5\text{-}14)$$

من المعلوم أن القيمة النمطية للطاقة المتحررة نتيجة للاحتراق الكامل لأنواع الوقود العادى حوالى 10^7 J لكل kg من المادة الداخلة فى التفاعل (الوقود زائد الأكسجين) . بماذا تخبرنا معادلة أينشتين عن مقدار التغير فى كتلة كل كيلو جرام من المادة عند احتراقه ؟ تخبرنا المعادلة (14–5) أن كل كيلو جرام من الكتلة يتغير بمقدار :

$$\Delta m = \frac{1\times 10^7 \text{ J}}{(3\times 10^8 \text{ m/s})^2} = 1.1\times 10^{-10}\text{ kg}$$

وعليه فإن التفاعل الكيميائى النمطى يمكن أن يغير كتلة المواد المتفاعلة بما يعادل جزءًا واحدًا من عشرة بلايين جزء ، وهذا التغير فى الكتلة لا يمكن قياسه بأكثر الطرق ضباطة فى الوقت الحالى . وهكذا فإننا فى خبراتنا اليومية مع التفاعلات الكيميائية لا نحس إطلاقا بأى تغير فى الكتلة .

ولكن عند دراسة الأنوية الذرية سنجد أن البروتونات والنيوترونات ، والتى تسمى **بالجسيمات الأولية** ، مترابطة مع بعضها البعض بقوة ترابط نووى أشد كثيرًا من القوى الكهرومغناطيسية بين الذرات . كذلك فإن التفاعلات الكيميائية لا تغير هذه البنى النووية ، ولكن التفاعلات النووية كالانشطار والاندماج تغيرها . والانشطار هو عملية تنشق فيها الأنوية الثقيلة كاليورانيوم والبلوتونيوم إلى شظايا أخف ، وهى مصدر الطاقة فى المفاعلات النووية الحالية . أما الاندماج فيتضمن التصاق واندماج

الأنوية الخفيفة مكونة بنى نووية أكثر تعقيدًا . ومن أهم التفاعلات الاندماجية النووية اندماج أربع أنوية أيدروجين لتكوين نواة هيليوم واحدة ، وهذا هو المصدر الرئيسى لتوليد الطاقة فى الشمس .

عند قياس الكتلة الكلية قبل وبعد التفاعل النووى الانشطارى أو الاندماجى بعناية شديدة سوف نجد أنها قد نقصت نقصًا كبيرًا . علاوة على ذلك فإن هذا النقص فى الكتلة يرتبط بالطاقة المتحررة فى التفاعل بصورة تتفق تمامًا مع المعادلة (14-5) . ففى حالة الانشطار سنجد أن حوالى 0.1 فى المائة من الكتلة الأصلية للنواة الثقيلة يتحول إلى طاقة ، بينما ترتفع هذه النسبة إلى 0.8 فى المائة تقريبًا فى حالة الاندماج ومن الواضح أن هاتين القيمتين تمثلان تغيرًا محسوسًا فى الكتلة ، بعكس ما يحدث فى التفاعلات الكيميائية النمطية . وهكذا فإن كمية الطاقة المتحررة فى التفاعلات النووية لكل كيلو جرام من المادة المتفاعلة أكبر من نظيرتها فى التفاعلات الكيميائية بمقدار 10 إلى 100 مليون مرة تقريبًا .

يمكن حدوث التحول النهائى للمادة إلى طاقة إذا وجدت عملية ما تختفى فيها الكمية الابتدائية من المادة تمامًا وتحل محلها طاقة إشعاعية صرفة (ضوء) عديمة الكتلة هذا التحول بنسبة 100 فى المائة شوهد بالفعل فى المختبر فى عملية تسمى **فناء المادة وضديد المادة** . ذلك أن لكل جسيم أولى نسخة ضديدة مطابقة لا توجد فى حالة مستقرة ، ولكنها تتكون لفترات وجيزة فى التفاعلات النووية . وعلى سبيل المثال يمكننا ذكر ضديد الإلكترون ؛ أو البوزيترون ؛ وهو جسيم له نفس الخصائص الفيزيائية المميزة للإلكترون باستثناء شحنته الكهربائية فهى موجبة . وعندما يتصادم الإلكترون والبوزيترون ينتهى وجودهما تمامًا ويخلق بدلاً منهما شعاعان من أشعة جاما عديمة الكتلة . وهى طاقة إشعاعية (أو ضوء) ذات طول موجة قصير جدًا . وبقياس الطاقة الكلية لشعاعى جاما وجد أنها تساوى بالضبط الكتلة الكلية الأصلية للإلكترون والبوزيترون مضروبة فى c^2 .

كذلك أمكن مشاهدة العملية العكسية ؛ أى خلق أزواج المادة وضديد المادة من إشعاع جاما صرف . هذه النتائج تمثل تحقيقًا أكيدًا لا شك فيه لنظرية أينشتين النسبية .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الشغل ، (ب) الجول ، (جـ) القدرة ، (د) الواط ، (هـ) الكيلو واط . ساعة ، (و) طاقة الحركة ، (ز) طاقة الجهد التثاقلى ، (ح) نظرية الشغل والطاقة ، (ط) قانون بقاء الطاقة ؛ (ى) كفاءة الآلة ؛ (ك) IMA و AMA للآلة .

2 ـ الشغل المبذول على جسم بواسطة قوة معينة عندما يتحرك الجسم مسافة معينة .

3 ـ حساب القدرة فى المواقف البسيطة . التحويل من الواط إلى القدرة الحصانية والعكس .

4 ـ التغير فى طاقة حركة جسم يقع تحت تأثير صافى قوة معلوم خلال مسافة معلومة .

5 ـ حساب التغير فى طاقة الجهد التثاقلى لجسم عندما ينتقل من مكان إلى آخر .

6 ـ التفرقة بين القوى المحافظة وغير المحافظة .

7 ـ ضرب بعض الأمثلة للتحول المتبادل لطاقة الحركة وطاقة الوضع وكذلك للتحول المتبادل لطاقة الحركة والطاقة الحرارية .

8 ـ ذكر ما يحدث للطاقة المفقودة عندما يبذل شغل ضد قوى الاحتكاك .

9 ـ استخدام قانون بقاء الطاقة في صورة نظرية الشغل والطاقة الموسعة لحل المسائل البسيطة التي تتضمن التحول المتبادل لطاقتي الحركة والوضع والطاقة الحرارية في نظام بما في ذلك الحالات التي يبذل فيها شغل على الجسم .

10 ـ حساب IMA و AMA وكفاءة آلة بسيطة بمعلومية البيانات اللازمة .

11 ـ استخدام المعادلة $E = mc^2$ لحساب كمية الطاقة المتحررة في تفاعل تقل فيه الكتلة بمقدار معلوم .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

الشغل والطاقة :

$$1 \text{ Joule (J)} = 1 \text{ N.m}$$

القدرة :

$$1 \text{ Watt (W)} = 1 \text{ J/s}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الشغل : الشغل المبذول بواسطة قوة F تؤثر على جسم بينما يعاني الجسم إزاحة s هو :

$$W = Fs \cos \theta$$

حيث θ الزاوية بين متجهي القوة والإزاحة .

خلاصة :

1 ـ بالرغم من أن القوة والإزاحة كميتان متجهتان إلا أن الشغل كمية غير متجهة .

2 ـ الشغل يمكن أن يكون صفرًا بثلاث طرق : (أ) القوة تساوي صفرًا ، (ب) الإزاحة تساوي صفرًا ، (جـ) $\cos \theta = 0$ أي عندما تكون القوة عمودية على اتجاه الحركة ($\theta = 90°$) .

3 ـ الشغل يمكن أن يكون موجبًا أو سالبًا تبعًا للزاوية بين F و s . إذا كانت $\theta < 90°$ يكون الشغل موجبًا ، عندما تكون $\theta = 90°$ يكون الشغل صفرًا ، عندما تكون $\theta > 90°$ يكون الشغل سالبًا . في حالة الاحتكاك تكون $\theta = 180°$ ، وهذا يعني أن الشغل المبذول بواسطة القوى الاحتكاكية يساوي $-fs$.

4 ـ إذا أثرت على الجسم قوى عديدة يحسب الشغل المبذول بواسطة كل قوة على حدة . صافي الشغل المبذول على الجسم يساوي المجموع الجبري لهذه الإسهامات المنفردة . هذه هي نفس النتيجة التي نحصل عليها إذا أوجدنا صافي القوة أولاً ثم حسبنا الشغل المبذول بواسطتها .

القدرة :

القدرة هي معدل بذل الشغل

$$P = \frac{W}{t}$$

خلاصة :

1 ـ القدرة تقاس بالواط (الجول لكل ثانية) فى النظام SI وبالقدرة الحصانية (hp) فى النظام البريطانى : $1\ \text{hp} = 746\ \text{W}$.

2 ـ إذا أثرت القوة F التى تبذل شغلاً على جسم سرعته v فإن القدرة التى تمد بها القوة هذا الجسم تكون :

$$P = Fv \cos \theta$$

حيث θ هى الزاوية بين F و v .

3 ـ من تعريف القدرة يمكن كتابة :

$$\text{الزمن} \times \text{القدرة} = \text{الشغل}$$

هذا يوصلنا إلى وحدة الطاقة الشائع استعمالها فى الصناعات الكهربائية وهى الكيلو واط ـ ساعة (kwh) :

$$1\ \text{kwh} = (1000\ \text{W})(3600\ \text{s}) = 3.6 \times 10^6\ \text{J}$$

طاقة الحركة :

طاقة الحركة (KE) هى الطاقة التى يكتسبها الجسم بسبب حركته .

$$\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$$

خلاصة :

1 ـ تقاس KE فى النظام SI بالجول كما فى حالة الشغل وكل أشكال الطاقة .

2 ـ KE يجب أن تكون موجبة دائمًا لأن m و v^2 لا يمكن أن تكونا سالبتين .

نظرية الشغل والطاقة لصافى القوة :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة صافى القوة} = W_{\text{ext}} = \Delta\text{KE}$$

طاقة الجهد التثاقلى :

طاقة الجهد التثاقلى (GPE) تعتمد على الارتفاع أو الموضع الرأسى للجسم بالنسبة إلى مستوى إسناد مختار ما . وطالما كان الجسم تحت تأثير قوة جاذبية ثابتة mg يمكن كتابة :

$$\text{GPE} = mgh$$

خلاصة :

1 ـ GPE يمكن أن تكون موجبة أو سالبة أو صفرًا ، ويعتمد ذلك على اختيار مستوى الإسناد الذى تقاس h بالنسبة إليه .

2 ـ التغيرات فى GPE لا تعتمد على المسار الذى يتخذه الجسم أثناء تغيير موضعه ، ولكنه يعتمد على الموضعين الرأسيين الابتدائى والنهائى .

3 ـ بالنسبة للأجسام ذات الأبعاد تعرف GPE بدلالة الموضع الرأسى لمركز الكتلة وفى حالة الأجسام المتماثلة المنتظمة يقع مركز كتلتها فى مركزها الهندسى .

القوى المحافظة :

إذا كان الشغل المبذول بواسطة قوة ما يعتمد فقط على موضعى نقطتى نهايتى المسار وليس على تفاصيل المسار يقال أن هذه القوة محافظة . وتعتبر قوة الجاذبية والقوى المرنة والقوى الكهروستاتيكية أمثلة للقوى المحافظة . وعندما تكون القوة محافظة يمكن تعريف طاقة الجهد المرتبطة بموضع الجسم .

الطاقة الحرارية :

الطاقة الحرارية TE هى الطاقة الداخلية للمادة والمرتبطة بالحركة العشوائية لذراتها وجزيئاتها . وإذا أثرت قـوى الاحتكـاك ، بما فى ذلك المقاومة الـهوائية ولزوجة الموائع ، على نظام سوف تزداد TE للنظام بمقدار يساوى كمية الشغـل المبـذول بواسـطة هذه القوى .

قانون بقاء الطاقة :

الطاقة لا يمكن أن تخلق أو تفنى فى أى عملية فيزيائية . عندما يحدث فقد فى أحد صورة الطاقـة تحـدث زيـادة مساوية فـى صور أخرى للطاقة .

خلاصة :

لا يوجد قانون بقاء لأى صورة معينة من صور الطاقة ، وينطبق القانون فقط على مجموع كل صور الطاقة التى قد توجد فى حالة محددة .

نظرية الشغل والطاقة الموسعة :

$$W_{ext} = \Delta KE + \Delta PE + \Delta TE$$

خلاصة :

1 ـ هذه النظرية ببساطة هى طريقة للتعبير عن قانون بقاء الطاقة عند تطبيقه على نظام معين .

2 ـ عند تطبيق نظرية الشغل والطاقة الموسعة يؤخذ الشغل المبذول بواسطة القوة المحافظة على النظام فى الاعتبار مـن خلال الحد ΔPE ، ويظهر الشغل المبذول بواسطة قوى الاحتكاك كزيادة فى الطاقة الحراريـة ΔTE للنظـام . W_{ext} يمثـل الشغـل المبذول بواسطة أى قـوى غير محافظة مـؤثرة على النظام من الخارج مثل قوى الشد أو الدفع على النظام . W_{ext} قـد يكـون موجبًا أو سالبًا .

الفائدة الميكانيكية للآلات البسيطة :

$$\text{(AMA) الفائدة الميكانيكية الفعلية} = \frac{F_0}{F_i}$$

حيث F_0 خرج القوة ، F_i دخل القوة .

$$\text{(AMA) الفائدة الميكانيكية المثالية} = \frac{s_i}{s_0}$$

حيث s_i ، s_0 هما المسافتان اللتان يؤثر خلالـهما خرج القوة ودخل القوة على الترتيب .

كفاءة الآلات البسيطة :

$$\text{الكفاءة \%} = 100 \times \frac{\text{خرج الشغل}}{\text{دخل الشغل}} = 100 \times \frac{AMA}{IMA}$$

خلاصة :

الكفاءة مقياس للنسبة المئوية مـن دخل الشغل الذى يتحول إلى خـرج شغل بواسطة الآلة . الكفاءة التى قيمتها 100 % هـى النسبة المئوية من دخل الشغل الذى يتحول إلى طاقة حرارية .

أسئلة وتخمينات

1 ـ يسافر عامل متجول ذو ضمير حي في إحدى الشاحنات الصندوقية بقطار شحن متجه من شيكاغو إلى بيوريا ، وطوال الطريق ظل هذا العامل يدفع بيديه الجدار الأمامي للشاحنة الصندوقية . ونظرًا لأنه كان طالب فيزياء في يوم ما اعتقد هذا الرجل أن قوة دفعه تبذل كمية كبيرة من الشغل لأن F_s و s كبيرتين . ما الخطأ في تفكيره ؟

2 ـ شخص يقف ساكنًا ليتحدث مع صديقه وهو يحمل كيسًا به بعض حاجياته من منتجات البقالة ، وسيارة تقف ساكنة وموتورها دائر . ما وجه الشبه بين هذين الموقفين من وجهة نظر الشغل والطاقة ؟

3 ـ عندما يدخل الصاروخ في الغلاف الجوي في طريق عودته من الفضاء تصبح مقدمته ساخنة جدًا . من أين تأتي هذه الطاقة الحرارية ؟

4 ـ عندما يدور قمر صناعي في مدار غير دائري حول الأرض يتغير مقدار سرعته باستمرار . اشرح سبب ذلك باستخدام مبدأ التحول المتبادل لطاقة الحركة والوضع . أين يصبح مقدار السرعة أكبر ما يمكن ، عند نقطة الأوج (أبعد نقطة عن الأرض) أو نقطة الحضيض (أقرب نقطة من الأرض) ؟

5 ـ صف موقفًا تكون فيه طاقة الجهد التثاقلي لجسم سالبة . هل يوافق الجميع على أنها سالبة ؟ هل يمكن أن تكون طاقة حركة جسم سالبة ؟

6 ـ لا تستطيع أي سيارة أن تتسارع على طريق زلق جدًا . افترض أن سيارة كتلتها m تتسارع من السكون إلى سرعة مقدارها v على طريق أفقي وأن عجلاتها لا تنزلق . ما مقدار الشغل المبذول بواسطة قوة الاحتكاك بين العجلات وسطح الطريق في هذه العلملية ؟

7 ـ هل الطاقة كمية متجهة أو قياسية ؟

8 ـ معامل الاحتكاك الانزلاقي لقالب على مستوى مائل كبير بدرجة كافية لكي لا يتحرك القالب من تلقاء نفسه . أثرت على القالب قوة موازية للمستوى المائل إلى أعلى فتحرك تحت تأثيرها بسرعة ثابتة . قارن بين مقادير الشغل المبذول بواسطة (أ) قوة الشد ، (ب) قوة الاحتكاك ، (جـ) قوة الجاذبية . كرر ذلك عندما يكون القالب متحركًا على المستوى المائل إلى أسفل .

9 ـ تزود السيارات والدارجات وكثير من الأجهزة بأنظمة تروس يمكن تغييرها بالنقل . ناقش لماذا يستخدم النقل بفرض أن هذه الأجهزة آلات مثالية .

10 ـ ما مقدار القدرة الحصانية التقريبية التي يمكن أن ينتجها إنسان لفترة زمنية قصيرة أثناء صعوده لمجموعة من درجات السلم بسرعة ؟

11 ـ قدر القيمة التقريبية للقوة التي يتعرض لها سائق سيارة عند تصادم سيارته بسيارة أخرى تصادمًا مباشرًا . افترض أن السيارتين متماثلتين وأن مقدار سرعة كل منهما 25 m/s . ناقش تأثير أحزمة الأمان وغيرها من وسائل الأمان .

12 ـ يستهلك قلب الإنسان حوالي 1 J من الطاقة في كل ضربة . كم جولاً من الطاقة يجب أن يوفرها الطعام للشخص يوميًا لكي تستهلك على هذا النحو ؟ تذكر لأغراض المقارنة أن السعر الغذائي من طاقة الطعام يكافئ 4184 J .

مسائل

القسم 5-1

1 ـ ما مقدار الشغل المبذول في شد صندوق مسافة قدرها 2 m على سطح منضدة بقوة أفقية قدرها 35 N ؟

2 ـ القوة اللازمة لشد عربة أطفال تساوى 240 N بحيث تؤثر فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 30° فوق الأفقى . ما مقدار الشغل المبذول خلال حركة العربة مسافة قدرها 10 m ؟

3 ـ تدفع امرأة جزازة عشب بقوة قدرها 180 N فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 24° تحت الأفقى . ما مقدار الشغل الذى تبذله المرأة عندما تدفع الجزازة مسافة أفقية قدرها 50 m ؟

■ 4 ـ تزحلقت سيارة كتلتها 1250 kg فوصلت إلى حالة السكون خلال 36 m . ما مقدار قوة الاحتكاك بين إطاراتها المتزحلقة الأربعة وسطح الطريق إذا كان معامل الاحتكاك 0.7 ؟ ما مقدار الشغل الذى تبذله قوة الاحتكاك على السيارة ؟

5 ـ رباع يرفع أثقالاً وزنها 400 N من الأرض إلى ارتفاع قدره 1.8 m . ما مقدار الشغل الذى يبذله الرجل بفرض أنه يحرك الأثقال بسرعة ثابتة المقدار ؟

6 ـ يرفع رجل دلوًا وزنه 200 N بسرعة ثابتة من بئر رأسية . فإذا كان الشغل المبذول لرفع الدلو إلى فتحة البئر 8 kJ . فما عمق البئر ؟

7 ـ يبذل بواب شغلاً قدره 360 J ضد قوة الاحتكاك ومقدارها 20 N فى دفع مكنسة قوية على الأرضية لمدة 4.5 s بفرض أن المكنسة تتحرك بسرعة ثابتة المقدار ، ما قيمة هذه السرعة ؟

8 ـ تشد طالبة كرتونة كتلتها 30 kg على أرضية بهو مدينتها الجامعية بقوة ثابتة F . إذا كان معامل الاحتكاك بين الكرتون والأرضية 0.5 ، ما مقدار الشغل اللازم أن تبذله الفتاة لتحريك الكرتونة 8 m ؟

9 ـ ما مقدار الشغل المبذول بواسطة لاعبة رياضية كتلتها 60 kg فى صعود مجموعة متتابعة من درجات السلم ارتفاعها الكلى 6 m ؟

10 ـ دفع صندوق شحن كتلته 80 kg مسافة قدرها 3.5 m إلى أعلى على معبر منحدر لا احتكاكى يميل بزاوية قدرها 24° بالنسبة للأفقى . ما مقدار الشغل المبذول فى دفع صندوق الشحن ؟ افترض أن صندوق الشحن يدفع بسرعة ثابتة المقدار .

11 ـ ما مقدار الشغل اللازم بذله فى المسألة السابقة إذا كان معامل الاحتكاك بين صندوق الشحن والمنحدر 0.3 وكانت قوة الدفع موازية للمنحدر ؟

12 ـ بتغيير زاوية ميل معبر مائل وجد عامل بالمرفأ أن كرتونة كتلتها 50 kg يمكن أن تنزلق إلى أسفل على معبر منحدر بسرعة ثابتة عندما تكون زاوية الميل 36° . ما مقدار الشغل الذى تبذله قوة الاحتكاك على الكرتونة أثناء انزلاقها 2.5 m ؟

القسم 5-2

13 ـ ما مقدار القدرة الحصانية لمصباح كهربائى قدرته 100 W ؟

14 ـ ما مقدار القدرة بالواط اللازمة لدفع عربة سوبر ماركت محملة بقوة أفقية قدرها 50 N مسافة أفقية مقدارها 20 m خلال 5 s ؟

15 ـ قوة احتكاك مقدارها 20 N تعاكس انزلاق كرتونة كتلتها 6 kg على أرضية أفقية . ما قيمة القدرة اللازم إمداد الكرتونة بها عند سحبها على الأرضية بسرعة ثابتة مقدار 0.6 m/s ؟

16 ـ ترفع آلة صندوق شحن كتلته 240 kg بسرعة ثابتة مسافة قدرها 5 m رأسيًا إلى أعلى خلال 6 s . ما قيمة خرج قدرة الآلة ؟

17 ـ يحتاج موتور قارب 100 hp لتحريك القارب بسرعة ثابتة مقدارها 16 m/s . ما قيمة قوة مقاومة الماء عند هذه السرعة ؟

18 ـ يستطيع جرار شد مقطورته بقوة ثابتة مقدارها 12,000 N عندما تكون سرعته 2.5 m/s . ما قيمة قدرة الجرار بالواط والقدرة الحصانية تحت هذه الشروط ؟

19 ـ ما مقدار السرعة المتوسطة التى يجب أن يتسلق بها طالب كتلته 64 kg حبلاً طوله 5 m حتى تتطابق قدرته مع مصباح كهربائى قدرته 150 W ؟

20 ـ يراد استخدام مضخة لرفع الماء من بئر إلى ارتفاع كلى قدره 3.0 m بمعدل قدره 0.6 kg/min . ما قيمة أقل قدرة للمضخة بالواط والقدرة الحصانية ؟

21 ـ استخدم موتور كهربائى يمكنه أن يعطى قدرة قيمتها 1.6 hp لرفع كرتونة كتلتها 20 kg مسافة قدرها 8 m . ما هى القيمة الصغرى للزمن اللازم لرفع الكرتونة ؟

22 ـ مصعد قدرة موتوره 11 hp . ما هى القيمة العظمى للثقل الذى يستطيع المصعد رفعه بسرعة ثابتة ارتفاعًا قدرها 36 m فى 10 s ؟

القسمان 3-5 و 4-5

23 ـ ما طاقة حركة عربة كتلتها 2000 kg تتحرك بمعدل 20 m/s ؟

24 ـ ما هى النسبة بين طاقة حركة سيارة تتحرك بسرعة مقدارها 100 km/h وطاقة حركة سيارة أخرى لها نفس الكتلة ولكنها تتحرك بمعدل 25 m/s ؟

25 ـ ما المسافة التى تقطعها رصاصة كتلتها 1.2 g وطاقة حركتها 1.2 J خلال 2.0 s ؟

26 ـ بأى سرعة يجب أن يجرى عداء كتلته 72 kg لتكون له نفس طاقة حركة سيارة كتلتها 1200 kg وسرعتها 2.0 km/h ؟

27 ـ ما مقدار الشغل اللازم لزيادة سرعة سيارة سيدان كتلتها 800 kg من 10 إلى 20 m/s . قارن هذا الشغل بالشغل اللازم بذله لزيادة السرعة بنفس المقدار ، ولكن من 20 إلى 25 m/s . إهمل قوى الاحتكاك .

28 ـ ما مقدار القوة اللازمة لكى يتسارع بروتون ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) من السكون إلى 3×10^{7} m/s خلال مسافة قدرها 2.0 m ؟ (البروتون هو ذرة أيدروجين فقدت إلكترونها) .

29 ـ يستطيع معجل الجسيمات المعروف باسم مولد فان دى جراف تعجيل حزمة من البروتونات ($m = 1.76 \times 10^{-27}$ kg) من السكون إلى سرعة قدرها 10^{7} m/s . إذا استخدمت إحدى هذه الآلات فى تعجيل 3.6×10^{16} بروتونًا فى الثانية ، فما مقدار القدرة بالواط التى تنتجها هذه الآلة ؟

30 ـ قذف الرامى فى فريق البيسبول الكرة بسرعة مقدارها 80 mi/h . ما مقدار طاقة حركة كرة البيسبول إذا كانت كتلتها 160 g ؟

31 ـ تتحرك عربة كتلتها 1000 kg بسرعة مقدارها 18 m/s . ما مقدار الشغل اللازم بذله بواسطة الفرامل لإيقاف العربة تمامًا خلال مسافة قدرها 24 m ؟

32 ـ اصطدمت رصاصة كتلتها 1.5 g وسرعتها 400 m/s بقالب خشبى فوصلت إلى السكون على عمق 5 cm . (أ) ما مقدار متوسط قوة التقاصر ؟ (ب) ما الزمن الذى تستغرقه الرصاصة للوصول إلى السكون ؟

33 ـ بينما كان أحد لاعبى كرة القدم وكتلته 90 kg يجرى بسرعة قدرها 6 m/s قام لاعب من الفريق الآخر بشده من الخلف فتوقف بعد أن قطع مسافة قدرها 1.8 m . (أ) ما مقدار متوسط القوة التى سببت إيقاف اللاعب ؟ ما الزمن الذى استغرقه اللاعب ليتوقف تمامًا ؟

34 ـ ركل طفل مزلجته وكتلتها 8 kg على بركة متجمدة فاكسبها سرعة ابتدائية مقدارها 2 m/s ، وكان معامل الاحتكاك بين قاع المزلجة والثلج 0.12 . استخدم طريقة الطاقة لإيجاد المسافة التى تقطعها المزلجة قبل الوصول إلى السكون .

الأقسام من 5-5 إلى 7-5

35 ـ ما قيمة طاقة الجهد التثاقلى لكرة بولينج كتلتها 12 kg على قمة مبنى ارتفاعه 150 m بالنسبة إلى الأرض ؟

36 ـ آنية زهور (فازة) كتلتها 2.0 kg موضوعة على رف يرتفع بمقدار 0.5 m عن سطح منضدة ارتفاعها عن الأرض 0.8 m . ما مقدار طاقة الجهد التثاقلى لآنية الزهور (أ) بالنسبة إلى سطح المنضدة ؟ (ب) بالنسبة إلى الأرض ؟

37 ـ كرتان كتلة الأولى 5 kg وكتلة الثانية 3.0 kg معلقتان بحبل على بكرة بحيث كانت الكرة الأولى مستقرة على سطح منضدة . ما مقدار التغير فى طاقة وضع النظام عندما ترتفع الكرة الأولى مسافة قدرها 50 cm ؟

38 ـ يصعد جوّال كتلته 75 kg تلا ارتفاعه 600 m . (أ) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة الجوّال ضد الجاذبية ؟ (ب) هل تعتمد هذه الكمية من الشغل على المسار الذى يتخذه الجوّال ؟ (إهمل قوة الاحتكاك) . (أ) إذا استغرق الجوال 96 min فى صعود التل ، ما متوسط القدرة الحصانية المستهلكة ؟

القسمان 8-5 و 9-5

39 ـ استغرقت شاحنة لنقل البضائع كتلتها 16,000 kg زمنًا قدره 45 min فى الصعود على طريق جبلى من ارتفاع قدره 1500 m إلى آخر قدره 2700 m. ما مقدار الشغل الذى تبذله الشاحنة ضد الجاذبية ؟ (ب) ما قيمة القدرة الحصانية المتوسطة التى تستهلكها الشاحنة ضد الجاذبية ؟

40 ـ بأى سرعة ترتطم كرة كتلتها 0.5 kg بالأرض إذا أسقطت من ارتفاع قدره 40 m ؟ (إهمل الاحتكاك) .

41 ـ ينزلق صندوق بضائع بقالة من السكون وبدون احتكاك على معبر منحدر يصنع زاوية قدرها $30°$ مع الأفقى . ما سرعة الصندوق بعد انزلاقه مسافة قدرها 2.0 m على المعبر المنحدر ؟

42 ـ قذف جسم رأسيا إلى أعلى فوصل إلى ارتفاع قدره h . إلى أى ارتفاع ، بدلالة h ، يصل الجسم عندما يكون قد فقد نصف طاقة حركته ؟ وما مقدار سرعة الجسم عند هذه النقطة ؟

43 ـ أسقط صندوق كتلته 3 kg من ارتفاع قدره 10 m وكانت سرعته قبل الاصطدام بالأرض مباشر 10 m/s . ما مقدار القوة المتوسطة المعوقة للحركة ؟

44 ـ يستطيع موتور أن يرفع مصعدًا كتلته 960 kg من السكون عند مستوى سطح الأرض بحيث يصل مقدار سرعته إلى 3.2 m/s على ارتفاع قدره 24 m . ما قيمة الشغل الذى يبذله الموتور ؟ ما هى النسبة المئوية من الشغل الكلى التى تظهر كطاقة حركة ؟

45 ـ بدأت كتلة مقدارها 3.2 kg الحركة من السكون من قمة مستوى مائل زاويته $30°$ وطوله 6.0 m فوصلت سرعته إلى 3.0 m/s عند القاع . استخدم طرق الطاقة لإيجاد متوسط قوة الاحتكاك التى تعوق الحركة الانزلاقية .

46 ـ انزلق صندوق على منحدر زاويته $30°$ فوصلت سرعته عند القاع إلى 5.0 m/s . (أ) ما هى المسافة التى انزلقها الصندوق على المنحدر إذا كان الاحتكاك مهملا ؟ (ب) ما قيمة هذه المسافة إذا كان معامل الاحتكاك الحركى 0.2 ؟

■ 47 ـ بدأت قاطرة فى شد مجموعة من الشاحنات الصندوقية من السكون إلى أعلى على مستوى مائل زاويته $3°$ ، فوصلت السرعة إلى 45 km/h بعد أن قطع القطار مسافة قدرها 2.4 km . افترض أن الكتلة الكلية للقطار 6.4×10^5 kg . (أ) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة القاطرة ؟ (ب) ما هى النسبة بين الشغل المبذول ضد الجاذبية والشغل الكلى ؟ (جـ) ما الزمن الذى يستغرقه القطار للوصول إلى هذه السرعة بغرض أن العجلة ثابتة ؟ (د) ما متوسط القدرة الحصانية التى تستهلكها القاطرة خلال هذا الزمن ؟

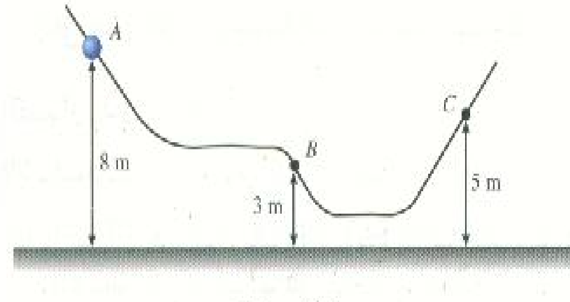
■ 48 ـ يستخدم موتور كهربائى لتشغيل مضخة تستطيع رفع 1.0 kg من الماء الموجود فى خزان إلى ارتفاع قدره 2.2 m خلال 200 s . افترض أن سرعة الماء عند القمة 1.5 m/s . ما قيمة خرج القدرة الحصانية للموتور إذا كانت سرعة الماء فى الخزان مهملة ؟

■ 49 ـ قذفت كرة كتلتها 240 g رأسيًا إلى أعلى بسرعة قدرها 14 m/s . (أ) إلى أى ارتفاع تصل الكرة إذا كان الاحتكاك مهملا ؟ (ب) إذا وصلت الكرة إلى ارتفاع قدره 6.5 m ، فما هى القيمة المتوسطة لمقاومة الهواء التى تعوق الحركة ؟ (جـ) بأى سرعة تعود الكرة إلى القاذف إذا أخذ تأثير قوة الاحتكاك فى الجزء (ب) فى الاعتبار .

50 ـ بدأ قالب من الثلج الانزلاق من السكون من قمة مستوى مائل زاويته $30°$ وطوله 160 cm . ما مقدار سرعة القالب عند القاع ، (أ) إذا كان المستوى المائل لا احتكاكيا ؟ (ب) إذا كانت قوة الاحتكاك 1.0 N ؟

■ 51 ـ بدأت طفلة الانزلاق من السكون عند قمة مزلقة أطفال ارتفاعها 4 m . إذا وصلت الطفلة إلى القاع بسرعة مقدارها 6 m/s ، فما هي النسبة المئوية المفقودة من طاقتها الكلية عند قمة المزلقة نتيجة للاحتكاك ؟

52 ـ تبدأ عربة من عربات الأفعوانية من السكون عند النقطة A لتتحرك على القضبان كما هو مبين بالشكل م1-5 . أوجد مقدار سرعة العربة عند النقطتين B و C بفرض أن القضبان لا احتكاكية .



شكل م1-5

53 ـ أوجد مقدار سرعة العربة عند النقطتين B و C في المسألة السابقة بفرض أن القضبان لا احتكاكية وأن سرعتها 1.5 m/s إلى اليسار عند المرور بالنقطة A .

■ 54 ـ في الشكل م1-5 تبدأ عربة كتلتها 400 kg الحركة من السكون عند A وتمر بالنقطة B بسرعة مقدارها 3 m/s . إذا كانت المسافة من A إلى B على طول القضبان 20 m ، فما متوسط قوة الاحتكاك التي تعوق حركة العربة .

55 ـ علقت كرة كتلتها كثقل بندول في طرف خيط طوله 3.6 m . إذا بدأت الكرة الحركة من السكون عندما كان الخيط يصنع زاوية قدرها $60°$ مع الرأسي ، فما مقدار سرعة الكرة عندما تمر بالنقطة التي تقع تحت نقطة التعليق مباشرة ؟ (إهمل الاحتكاك الهوائي)

56 ـ ما مقدار سرعة كرة البندول في المسألة السابقة عندما يصنع الخيط زاوية قدرها $30°$ مع الرأسي ؟

■ 57 ـ عند السرعات العالية تتناسب قوى الاحتكاك المؤثرة على سيارة طرديًا مع v^2 ، حيث v مقدار سرعة السيارة . إذا كان الاحتكاك هو العامل الوحيد المعوق لحركة السيارة وكان معدل استهلاك البنزين 30 kg/gal عند السرعة 80 km/h ، فما معدل الاستهلاك عند السرعة 100 km/h ؟

■ 58 ـ بدأ قالب كتلته 625 g الانزلاق إلى أعلى فوق مستوى مائل زاويته $30°$ بسرعة مقدارها 2.2 m/s ، فتوقفت بعد انزلاقه مسافة قدرها 40 cm ثم بدأ الانزلاق إلى أسفل . بفرض أن قوة الاحتكاك المعوقة لحركة القالب ثابتة ، (أ) ما مقدار قوة الاحتكاك ؟ (ب) ما مقدار سرعة القالب عندما يصل إلى القاع ؟

القسم 5-10

59 ـ يراد رفع جسم كتلته 640 kg بمساعدة بكارة باستخدام قوة قدرها 440 N . وقد وجد أن الآلة المناسبة لهذا الغرض تستطيع رفع الحمل مسافة قدرها 0.45 m عندما تتحرك القوة المستخدمة 9.6 m . أوجد (أ) AMA ، (ب) IMA ، (جـ) كفاءة الآلة .

60 ـ بكارة تستطيع رفع كتلة مقدارها 240 kg باستخدام قوة قدرها 180 N . إذا كانت كفاءة البكارة 87 في المائة ، أوجد (أ) AMA ، (ب) IMA ، (جـ) $s_i \ / \ s_0$.

61 ـ ما مقدار النسبة بين نصفي قطري جهاز العجلة ومحور العجلة إذا أريد استخدام هذا الجهاز لرفع حمل كتلته 24 kg باستخدام قوة قدرها 28 N ؟ افترض أن كفاءة الجهاز 89 في المائة .

62 ـ استخدم عامل مرفاع سيارة معين فوجد أن يده (دخل القوة) تتحرك 38 cm لكل 1.0 cm من المسافة التي يرتفعها الحمل . (أ) ما قيمة IMA للمرفاع ؟ (ب) ما مقدار القوة اللازمة لرفع حمل وزنه 3600 N بفرض أن كفاءة الآلة 22 في المائة ؟

63 ـ يحمل موتور كهربائي بطاقة تفيد أن قدرته 0.5 kW بفرض أن كفاءة الموتور 88 في المائة ، ما مقدار القدرة الحصانية التي يمكن أن يعطيها الموتور ؟

■ 64 ـ موتور قدرته 0.25 hp يحمل عموده بكرة قطرها 7.2 cm . فإذا كان العمود يدور بمعدل 1600 rev/min ، فما مقدار الحمل الذي يمكن شده بواسطة السير الذي يجرى على البكرة ؟ افترض أن كفاءة الموتور 89 في المائة .

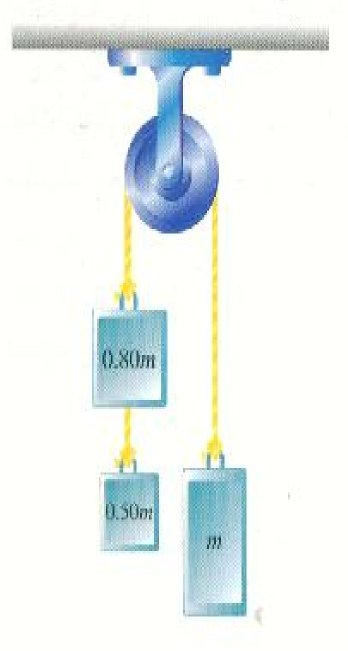
■ 65 ـ موتور معين قدرته 55 W يعمل بسرعة عمود قدرها 1800 rev/min ، وبسبب مجموعة التروس الخافضة يدور العمود النهائي (عمود الخرج) بمعدل 16 rev/min فقط . (أ) إذا كانت كفاءة الآلة 33 في المائة ، بأي قوة يستطيع الموتور شد السير على بكرة نصف قطرها 3.2 cm مركبة على عمود الخرج ؟ (ب) إذا عكس نظام التروس بحيث يدور عمود الخرج بمعدل 160,000 rev/min ، ما مقدار القوة المتاحة لشد السير على نفس البكرة ؟ افترض أن خرج قدرة الموتور 55 W .

مسائل عامة

66 ـ يرفع جسم رأسيًا إلى أعلى مسافة قدرها 6 m باستخدام خيط خفيف قوة الشد فيه 84 N . (أ) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة قوة الشد ؟ (ب) ما قيمة الشغل المبذول بواسطة الجاذبية ؟ (جـ) ما مقدار سرعة الجسم إذا بدأ الحركة من السكون ؟ إهمل قوة الاحتكاك .

■■ 67 ـ لعبة أطفال على هيئة سيارة تعمل بموتور كهربائي خرج قدرته ثابت . تستطيع هذه السيارة أن تصعد مستوى مائل بزاوية قدرها °24 بمعدل 16 cm/s ، بينما يمكنها الحركة على منضدة أفقية بمعدل 39 cm/s . إذا علمت أن قوة الاحتكاك المعوقة للحركة تساوى kv ، حيث k مقدار ثابت و v مقدار سرعة السيارة ، فما هي زاوية ميل مستوى مائل تستطيع السيارة صعوده بسرعة مقدارها 28 m/s ؟

■■ 68 ـ حرر النظام المبين بالشكل م2-5 من السكون ، وبعد أن صعدت الكتلة اليمنى مسافة قدرها 72 cm قطع الحبل الذي يحمل الكتلة 0.5 m . ما مقدار سرعة الكتلة اليمنى عند عودتها إلى موضعها الابتدائي ؟



شكل م2-5

■■ 69 ـ تحرك قالب إلى أعلى على مستوى مائل زاويته °30 تحت تأثير قوة أفقية (غير موازية للمستوى المائل) مقدارها 45 N . اعتبر أن معامل الاحتكاك يساوى 0.12 وأن القالب قد تحرك إلى أعلى على المستوى المائل مسافة قدرها 1.8 m . (أ) أوجد الشغل المبذول بواسطة القوة المؤثرة ، (ب) الشغل المبذول بواسطة الجاذبية ، (جـ) الشغل المبذول بواسطة الاحتكاك ، (د) التغير في طاقة حركة القالب .

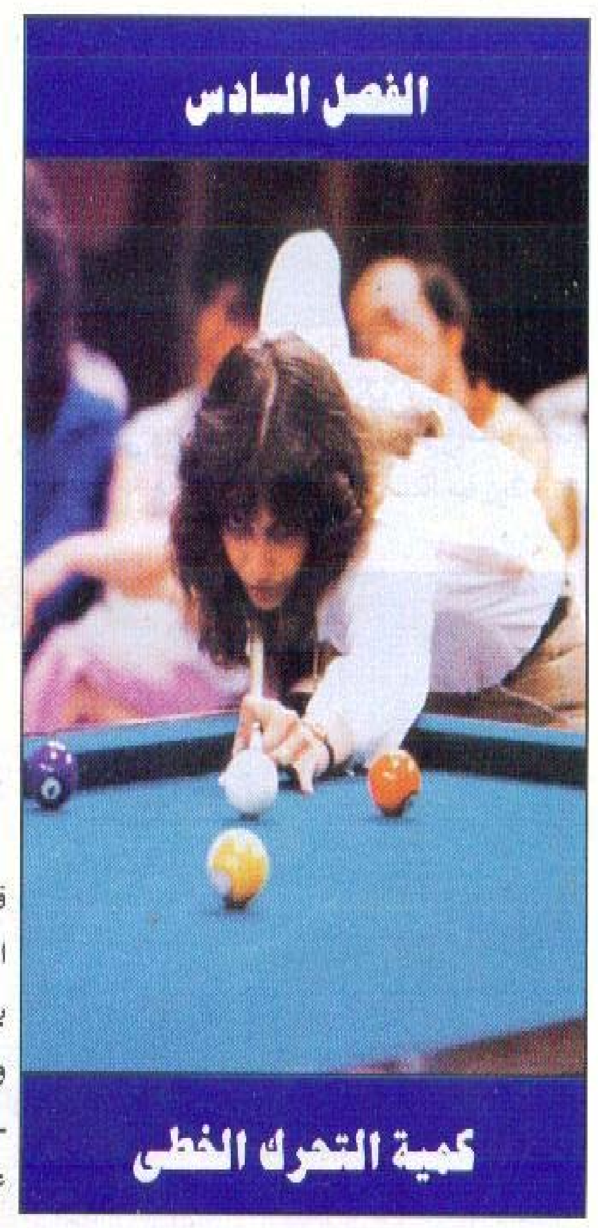
■ 70 ـ جاك وجيل لاعبا سيرك كتلتهما الكلية 120 kg . بدأ اللاعبان تأرجحًا طوله 5 m عندما كان الحبل المتصل بالأرجوحة يصنع في البداية زاوية قدرها °36 مع الأفقي . وعند قاع القوس قفز جيل من الأرجوحة . فإذا كانت كتلة جيل 52 kg ، فما أقصى ارتفاع يصل إليه جاك في نهاية التأرجح ؟

■ 71 ـ سقطت إحدى هواة السباحة في الهواء وكتلتها 60 kg من السكون من ارتفاع قدره 2400 m فوق سطح الأرض . وبعد أن قطعت الفتاة أول 1000 m وصلت سرعتها إلى قيمة ثابتة مقدارها 60 m/s . (أ) ما مقدار الشغل المبذول بواسطة المقاومة الهوائية خلال أول 1000 m ؟ (ب) ما مقدار الشغل الذي تبذله هذه القوة خلال مسافة تالية مقدارها 800 m ؟

72 ـ يستطيع محرك نفاث بذل قوة (تسمى دفع المحرك) مقدارها 50,000 lb عندما يكون صمام الخنق فى وضع الفتح التام . إذا كانت الطائرة متحركة بمعدل 240 km/h عند الإقلاع ، فما مقدار القدرة التى يولدها المحرك بالواط وبالقدرة الحصانية ؟

▪ 73 ـ شخص كتلته 72 kg يستهلك 420 W من القدرة عندما يمشى على سير متحرك بسرعة مقدارها 2.0 m/s . وعندما يكون السير مائلاً ومتحركاً بنفس مقدار السرعة ترتفع القدرة المستهلكة إلى 640 W . بفرض أن كل الزيادة فى خرج القدرة يستهلك فى التغلب على قوة الجاذبية ، أوجد زاوية ميل السير .

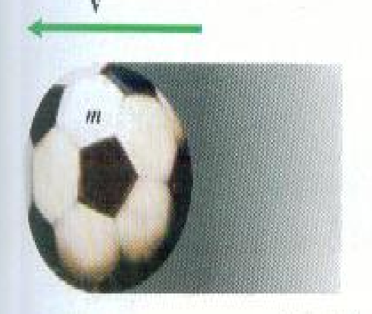
▪ 74 ـ أطلق مقذوف نارى كتلته 0.5 kg أفقيًا بسرعة ابتدائية مقدارها 2.0 m/s قمة مبنى ارتفاعه 100 m . أوجد (أ) الشغل المبذول بواسطة الجاذبية على المقذوف ، (ب) التغير فى طاقة الحركة اعتبارًا من لحظة إطلاق المقذوف ، (جـ) طاقة الحركة النهائية للمقذوف ؛ وذلك فى اللحظة السابقة لاصطدام المقذوف بالأرض مباشرة .



قانون بقاء الطاقة الذى نوقش فى الفصل السابق ليس قانون البقاء الوحيد الذى تخضع له الطبيعة . المثال الثانى هو قانون بقاء كمية التحرك الخطى ، وهذا سيكون موضوع الفصل الحالى . وسوف نرى أن هذا القانون نتيجة مباشرة لقانون نيوتن الثالث ـ قانون الفعل ورد الفعل ، كما سنتعرض لمناقشة بعض تطبيقاته على عمليات التصادم والمحركات الصاروخية . علاوة على ذلك سوف نعرف مركز كتلة نظام من الأجسام ونناقش أهمية هذا المفهوم . كذلك سوف نثبت كمية التحرك الخطى وقانون بقائها . أنهما أداتان مفيدتان للغاية عند استمرارنا فى دراسة قوانين الفيزياء .

6-1 مفهوم كمية التحرك الخطى

كلنا يعلم من خبرته العامة أن الأجسام المتحركة لها خاصية تمكنها من التأثير بقوة معينة على أى شخص أو أى شيء يحاول إيقافها . وكلما كانت سرعة الجسم أكبر كلما كان من الصعب إيقافه . علاوة على ذلك ، كلما زادت كتلة الجسم كلما زادت صعوبة إيقافه . فمثلاً ، من السهل إيقاف دراجة متحركة بسرعة مقدارها 2 m/s ، ولكن إيقاف سيارة متحركة بنفس مقدار السرعة ليس بهذه الدرجة من السهولة . وقد أطلق نيوتن على هذه الخاصية للجسم المتحركة اسم **كمية الحركة** ، ولكنها تسمى اليوم **كمية التحرك الخطى** للجسم المتحرك .



شكل 1-6 :
كمية التحرك الخطى لهذا الجسم تساوى $m\mathbf{v}$ وهى كمية متجهة .

تعرف كمية التحرك الخطى بالطريقة الآتية . تأمل كرة القدم الموضحة بالشكل 1-6 ، ولنفرض أن كتلتها m وسرعتها $\mathbf{v}$. بالنسبة إلى هذه الكرة

$$\text{كمية التحرك الخطى} = \mathbf{p} = m\mathbf{v} \qquad (6\text{-}1)$$

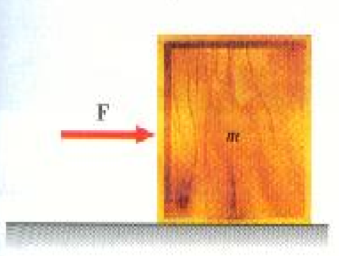
حيث $\mathbf{p}$ هو الرمز المستخدم لكمية التحرك الخطى . ونظرًا لأن كمية التحرك الخطى كمية مشتقة فإن وحداتها تستنتج من تعريفها ؛ وهذه الوحدات هى kg.m/s فى نظام الوحدات SI . هذه حالة لم يُعط فيها اسم خاص لوحدة مشتقة .

لاحظ أن كمية تحرك جسم تكون كبيرة إذا كانت كتلته كبيرة وسرعته كبيرة . كذلك تبين معادلة تعريف كمية التحرك أنها كمية متجهة ، وأن اتجاهها هو نفس اتجاه سرعة الجسم $\mathbf{v}$. لاحظ أخيرًا أن كلاً من كمية التحرك الخطى وطاقة الحركة يعتمدان على كتلة الجسم ومقدار سرعته . هذا ويرتبط مقدار كمية تحرك الجسم بطاقة حركته بالطريقة البسيطة الآتية :

$$\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} \qquad \text{و} \qquad P^2 = 2m(\text{KE}) \qquad (6\text{-}2)$$

6-2 قانون نيوتن الثانى بصيغة أخرى

هناك علاقة هامة بين صافى القوة المسلطة على جسم والتغير فى كمية التحرك الخطى الناتج عن هذه القوة . فعندما يؤثر على الجسم صافى قوة معين $\mathbf{F}$ فإنه يتسارع ؛ أى أن سرعته تزداد وبالتالى تزداد كمية تحركه . لندرس الآن هذه العلاقة لنرى كيف يبدو قانون نيوتن الثانى عند كتابته بدلالة كمية التحرك الخطى .



شكل 2-6 :
صافى القوة المؤثرة $\mathbf{F}$ يسبب زيادة كمية التحرك الخطى لصندوق الشحن . كمية التحرك الخطى لها اتجاه ، وتكون الزيادة فى كمية التحرك الخطى فى اتجاه $\mathbf{F}$.

تأمل صندوق شحن كتلته m كالمبين بالكل 2-6 . حيث أن الصندوق يقع تحت تأثير القوة $\mathbf{F}$ فإنه يكتسب عجلة ولتكن $\mathbf{a}$ ؛ وبتطبيق قانون نيوتن الثانى يمكن كتابة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

وباستخدام تعريف العجلة $\mathbf{a} = (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0)/t$ تتحول المعادلة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ إلى الصورة :

$$\mathbf{F} = \frac{m(\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_0)}{t}$$

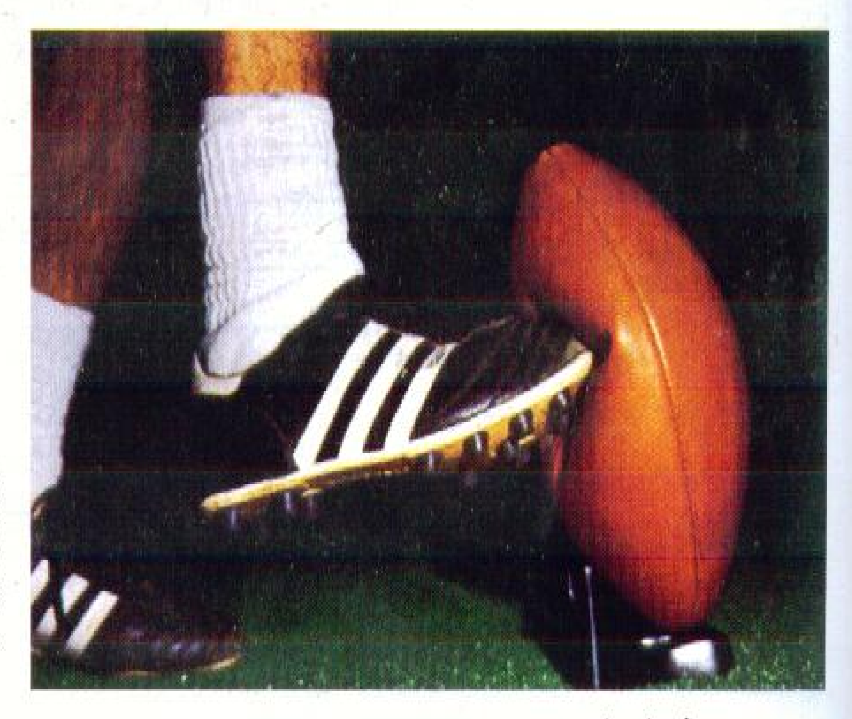
وهذه يمكن كتابتها كما يأتى :

$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{t} \qquad \text{أو} \qquad \frac{m\mathbf{v}_f - m\mathbf{v}_0}{t} \qquad (6\text{-}3)$$

حيث $\Delta\mathbf{p}$ التغير الحادث فى كمية التحرك الخطى خلال الزمن t . وبهذه الطريقة إذن أمكننا ربط صافى القوة المؤثرة على جسم بالتغير فى كمية تحركه الخطى .

المعادلة (3-6) فى الواقع هى الصورة التى صاغ بها نيوتن قانونه الثانى وليس $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. بأسلوب آخر ، تفيد المعادلة (3-6) أن صافى القوة المؤثر على جسم يساوى المعدل

الزمني لتغير كمية تحركه الخطي . ولكن يفضل في بعض المواقف استخدام المعادلة (3-6) وليس $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ لأن المعادلة الأخيرة تنطبق فقط عندما تكون كتلة الجسم ثابتة . ففي الوقت الحالي على سبيل المثال كثيرًا ما تعجل الجسيمات الذرية إلى سرعات عالية جدًا تؤدى إلى زيادة كتلتها . (كان أينشتين أول من تنبأ بهذه الظاهرة في نظرية النسبية ؛ انظر الفصلين الرابع والخامس والعشرين) . في مثل هذه المواقف تكون المعادلة (3-6) صحيحة ، بينما لا تكون $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ صحيحة ؛ وعليه يكون من الضروري استخدام قانون نيوتن الثاني في صورة المعادلة (3-6) طالما كانت كتلة الجسم المتسارع متغيرة . هذا وسنناقش في جزء لاحق من هذا الفصل أحد المواقف التي تكون فيه الكتلة متغيرة ، وهو على وجه التحديد حالة الصاروخ والدفع النفثي .



هذه الصورة الفوتوغرافية التقطت بسرعة عالية لتبين القوة اللحظية التي يؤثر بها قدم اللاعب على الكرة . حاصل ضرب هذه القوة في زمن تأثيرها هو الدفع المعطى للكرة ويساوى التغير في كمية تحركها .

قد يستلزم الأمر أحيانًا تطبيق مفهوم التغير في كمية التحرك على مواقف لا تكون القوة فيها ثابتة . فمثلاً ، لنفرض أن مضربًا يضرب كرة كتلتها m فيغير سرعتها من $\mathbf{v}_0$ إلى $\mathbf{v}_f$ خلال زمن تلامس الكرة مع المضرب t . في هذه الحالة علينا استخدام المعادلة (3-6) لتعريف القوة المتوسطة $\overline{\mathbf{F}}$ المؤثرة على الكرة بواسطة المضرب . وبضرب طرفي المعادلة في t نجد أن :

$$\overline{\mathbf{F}}t = \Delta \mathbf{p} \qquad (6\text{-}4)$$

هذه المعادلة تتحول في حالة المضرب والكرة إلى الصورة :

$$\overline{\mathbf{F}}t = m\mathbf{v}_f - m\mathbf{v}_0$$

حاصل الضرب $\overline{\mathbf{F}}t$ يسمى **دفع القوة** . ونظرًا لأن التغير في كمية التحرك يمكن قياسه بسهولة كبيرة ، من الممكن إيجاد قيمة الدفع بالرغم من صعوبة تعيين القوة المتوسطة وزمن التلامس .

مثال توضيحى 1-6 :

سيارة كتلتها 1500 kg تتحرك فى خط مستقيم وتخفض مقدار سرعتها من 20 m/s عند النقطة A إلى 15 m/s عند B خلال 3.0 s . ما مقدار القوة المتوسطة المعوقة لحركتها ؟

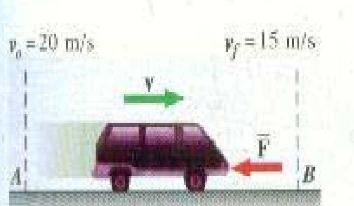
استدلال منطقى :

باستخدام قانون نيوتن الثانى مصاغاً بدلالة كمية التحرك ، المعادلة (6-3) يمكن كتابة :

$$\overline{\mathbf{F}} = \frac{m\,\mathbf{v}_f - m\,\mathbf{v}_0}{t}$$

لنأخذ اتجاه الحركة كاتجاه موجب . إذن $\mathbf{v}_0 = +20$ m/s ، $\mathbf{v}_f = +15$ m/s ، $t = 3.0$ s. وبعد إجراء التعويضات اللازمة نجد أن $\overline{\mathbf{F}} = -2500$ N . (لاحظ أننا استخدمنا إشارتى الزائد والناقص لبيان الاتجاه) . الإشارة السالبة للقوة المتوسطة تبين أنها فى الاتجاه السالب ، وهذه الحقيقة واضحة فى الشكل 6-3 .

تمرين : ما المسافة من A إلى B . **الإجابة** : 52.5 m .



شكل 6-3 :
تستغرق السيارة 3.0 s لقطع المسافة من A إلى B . عين $\overline{\mathbf{F}}$.

مثال 1-6 :

اصطدمت سيارة كتلتها 1200 kg ومقدار سرعتها 20 m/s بشجرة فوصلت إلى السكون خلال مسافة $s = 1.5$ m ؛ (انظر الشكل 6-4) . أوجد متوسط قوة إيقاف الشجرة للسيارة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين القوة الموقفة والتغير فى حركة السيارة ؟

الإجابة : لديك الاختيار فى كيفية وصف هذا التغير . يمكن حساب تقاصر السيارة كما سبق ، أو استخدام المصطلحات الجديدة لهذا الفصل بأن تقول أن **كمية تحرك** السيارة قد تغيرت ثم تربط القوة مباشرة بهذا التغير .

سؤال : ما قيمة التغير فى كمية تحرك السيارة ؟

الإجابة : $\Delta\mathbf{p} = m\mathbf{v}_f - m\mathbf{v}_0 = 0 - (1200\ \text{kg})(20\ \text{m/s}) = -24000\ \text{kg.m/s}$

لاحظ الإشارة السالبة فهى تبين أن اتجاه التغير فى كمية التحرك مضاد لاتجاه السرعة الابتدائية .

سؤال : ماذا يربط القوة الموقفة بالتغير فى كمية التحرك $\Delta\mathbf{p}$ ؟

الإجابة : دفع القوة يساوى $\Delta\mathbf{p}$ (المعادلة 6-4) .

$$\mathbf{F}t = \Delta\mathbf{p}$$

سؤال : كيف يعين زمن تأثير القوة ؟



شكل 6-4 :
ما مقدار القوة الموقفة للسيارة ؟

الإجابة : إذا لم يكن لدينا معلومات أخرى يمكننا افتراض أن التقاصر ثابت خلال زمن التصادم . ومن ثم يمكن تعيين مقدار السرعة المتوسطة ثم ربطه بمسافة التوقف والزمن :

$\bar{v} = \frac{v_f - v_0}{2} = 10\ m/s$ و $s = \bar{v}t$ ومنه نجد أن :

$$t = \frac{s}{\bar{v}} = \frac{1.5\ m}{10\ m/s} = 0.15\ s$$

الحل والمناقشة : الآن يمكن حساب متوسطة القوة الموقفة :

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{-24000\ kg.m/s}{0.15\ s} = -1.6 \times 10^5\ N$$

لاحظ مدى كبر هذه القوة (18 طنًا تقريبًا) . لاحظ أيضًا أنـها تعتمـد اعتمـادًا شديـدًا على المسافة التى تقطعها السيارة قبل الوصول إلى السكون ؛ إذ تقل القوة بزيـادة هـذه المسافة . لـهذا السبب تصمم مصدات السيارات الحديثـة وأجـزاء هيكلـها الخـارجى بحيث « تخضع » أثناء التصادمات وتمتص « الصدمة » بالتالى .

مثال توضيحى 2-6 :

لإيضاح مدى أهمية الأكياس الـهوائية فـى تقليـل الإصابـات فـى حـوادث تصادم السيارات ندرس معًا ما يأتى : بدون الكيس الـهوائى أو حـزام الأمـان لا يتوقـف (أو حتـى يتباطـأ) الجزء العلوى من جسم السائق عند التصادم ، بل إنه يستمر فى الحركة إلى أن يرتطم بعجلـة القيادة . وعليه فإن رأس السائق والجزء العلوى من جذعه سوف يصطدم بعجلـة القيـادة وهـو متحرك بنفس سرعة السيارة تقريبًا لحظة حدوث التصادم . افـترض أن مسـافة التوقـف ، أو « الخضوع » ، لعجلة القيادة 1 cm ، وأن الخضوع فى وجود الكيس الـهوائى 50 cm ؛ أما عن أنسجة الجسم فيمكن أن يصل الخضوع إلى 5 cm . لنفرض علاوة على ذلـك أن النصـف العلوى (30 kg) لسائق كتلته 60 kg سوف يرتطم بعجلة القيـادة أو الكيـس الـهوائى بنفس مقدار سرعة السيارة وهو 20 m/s . احسب القوة المؤثرة على السائق فى الحالتين .

استدلال منطقى : رأينا فى المثال 1-6 أن متوسط القوة المعوقة أثناء تصادم السيارة يعتمـد عكسيًا على المسافة التـى تتوقـف السيارة خلالـها . وقـد ذكـر أيضًـا فـى المثـال 1-6 أن السيارة تنضغط بقدر كبير نسبيًا (1.5 cm) . أما السائق فإنه لا يبدأ فى التوقف إلا بعد أن يرتطم بعجلة القيادة أو الكيس الـهوائى ، ومن ثـم لابـد أن يتوقـف جسم السـائق ورأسـه خلال مسافة أقصر ، وبالتالى زمن أقصر منه فى حالة السيارة . بالتعويض بالبيانات المعطاة عاليه فى معادلات المثال 1-6 سنجد فى حالة ارتطام جسم السائق بعجلة القيادة أن :

$$t = \frac{0.06\ m}{10\ m/s} = 0.0006\ s$$

أى أن الجسم يجب أن يتوقف خلال 6 ms ! هذا يتطلب قوة متوسطة قدرها :

$$\overline{\mathbf{F}} = \frac{0-(30\text{ kg})(20\text{ m/s})}{0.0006\text{ s}} = -1.0 \times 10^5\text{ N}$$

هذه القوة أكبر قليلاً من 11 طنًا !

وللكيس الهوائى :

$$t = \frac{0.56\text{ m}}{10\text{ m/s}} = 0.056\text{ s}$$

وتكون القوة المتوسطة فى هذه الحالة :

$$\overline{\mathbf{F}} = \frac{0-(30\text{ kg})(20\text{ m/s})}{0.56\text{ s}} = -1.1 \times 10^4\text{ N}$$

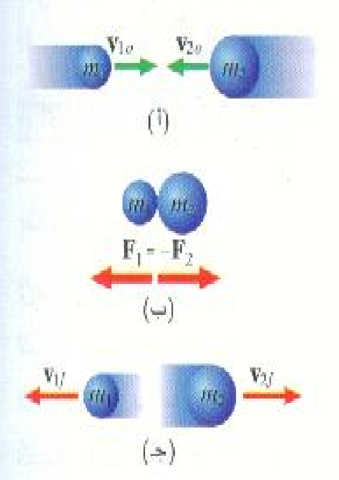
هذه القوة ، وتساوى 1.25 طنًا تقريبًا ، مازلت كبيرة ، ولكن عند توزيعها على مساحة الجسم الملامس للكيس الهوائى سيكون تأثيرها مماثل لتأثير القوة التى يتعرض لها الجسم عندما يغطس على عمق قدره 15 ft تحت الماء .

6-3 قانون بقاء كمية التحرك الخطى

رأينا فى الفصل الخامس أن الطاقة محفوظة وأن معرفة ذلك هام جدًا فى فهم العالم من حولنا . وسوف نثبت الآن أن كمية التحرك الخطى تخضع أيضًا لقانون بقاء مماثل .

لندرس تصادم الجسمين الموضحين بالشكل 5-6أ . هذان الجسيمان قد يكونا كرتين أو جزئيين أو أى جسمين آخريين . ونحن نعلم من قانون نيوتن الثالث أن الجسيمين يؤثران أحدهما على الآخر بقوتين متساويتين فى المقدار ولكنهما متضادتين فى الاتجاه . سنقوم الآن بحساب التغير فى كمية تحرك الجسيم الأيسر فى الشكل 5-6 نتيجة للتصادم . من المعادلة (3-6) ، أى قانون نيوتن الثانى مصاغًا بدلالة كمية التحرك ، نجد أن **القوة المتوسطة** هى :

$$\overline{\mathbf{F}}_1 t = m_1\,\mathbf{v}_{1f} - m_1\,\mathbf{v}_{10} = \Delta\mathbf{p}_1$$



شكل 5-6 :
عندما يتصادم الجسيمان فى الجزء (أ) تكون القوة المؤثرة على أحدهما مساوية للقوة المؤثرة على الآخر فى المقدار ومضادة لها فى الاتجاه ، كما فى الجزء (ب) . بأخذ هذه الحقيقة فى الاعتبار ، ماذا تستطيع أن تقوله عن كميتى التحرك فى (جـ) مقارنتين بقيمتيهما فى (أ) ؟



التصادمات التى تحدث بين اللاعبين فى المباريات الرياضية غير مرنة جزئيًا . لاحظ تشوه اللاعبين المتصادمين مما يوضح أن بعض الطاقة قد امتص امتصاصًا داخليًا .

وبالمثل ، بالنسبة للجسيم الأيمن :

$$\overline{\mathbf{F}}_2 t = m_2\,\mathbf{v}_{2f} - m_2\,\mathbf{v}_{20} = \Delta\mathbf{p}_2$$

الفترة الزمنية t تظهر فى كلتى المعادلتين لأن هذه الفترة الزمنية التى تتلامس خلالها الكرتان إحداهما مع الأخرى . بجمع هاتين المعادلتين نحصل على :

$$(\overline{\mathbf{F}}_1 + \overline{\mathbf{F}}_2)(t) = (m_1\,\mathbf{v}_{1f} - m_1\,\mathbf{v}_{10}) + (m_2\,\mathbf{v}_{2f} - m_2\,\mathbf{v}_{20}) \qquad (6\text{–}5)$$

$$= \Delta\mathbf{p}_1 + \Delta\mathbf{p}_2 = \Delta\mathbf{p}_{tot}$$

حيث تعرف كمية التحرك الكلية للنظام كما يأتى :

$$\mathbf{P}_{tot} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$$

وحيث أن متجه $\mathbf{F}_1$ ، أى قوة الفعل ، تساوى قوة رد الفعل $\mathbf{F}_2$ فى المقدار وتضادها فى الاتجاه ، إذن $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$ ، وبذلك يكون الطرف الأيسر للمعادلة (6–5) صفرًا . وعليه :

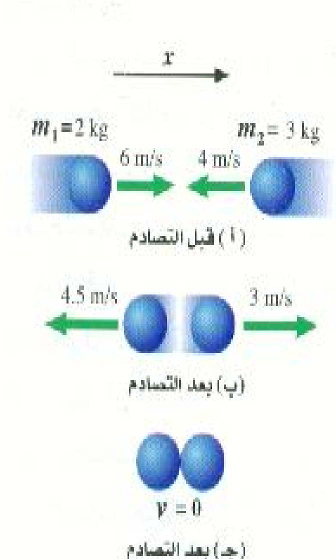
$$\Delta\mathbf{P}_{tot} = 0$$

معنى هذه المعادلة بالألفاظ أن كميتى التحرك **المنفردتين** للنظام يمكن أن يتغيرا ، ولكن فقط بحيث تظل كمية التحرك الكلى محفوظة :

$$\Delta\mathbf{p}_1 = -\Delta\mathbf{p}_2$$

من الممكن تعميم هذا الخط فى التفكير على الأنظمة الأكثر تعقيدًا . ولتحقيق ذلك فإننا نعرف ما يسمى **بالنظام المعزول** كما يلى : النظام المعزول هو مجموعة من الأجسام محصلة القوى المؤثرة عليها من الخارج صفرًا . وفى مثل هذه المجموعة (أو النظام) من الأجسام إذا وقع أحد الأجسام تحت تأثير قوة ما ، يجب أن تؤثر قوة أخرى مساوية لها فى المقدار ومضادة لها فى الاتجاه على جسم آخر فى المجموعة . ونتيجة لذلك فإن التغير فى كمية التحرك الكلية لمجموعة الأجسام ككل يساوى الصفر دائمًا . هذه الاعتبارات تنطبق على أى نظام معزول ، ويمكن تلخيصها فيما يسمى **بقانون بقاء كمية التحرك الخطى** كما يلى :

كمية التحرك الخطى الكلية لنظام معزول ثابتة .



شكل 6-6 : الموقفان الموضحان فى (ب) و (جـ) هما نتيجتان محتملتان من الناحية الفيزيائية لتصادم الجسمين الموضحين فى (أ) . فى كلتا الحالتين لابد أن تكون كمية التحرك الكلى للنظام قبل التصادم مساوية لكمية التحرك بعد التصادم ، وصفرًا على وجه التحديد . وعليه فإن كمية التحرك محفوظة بالرغم من أن طاقة الحركة ليست كذلك .

وحتى إذا لم يكن النظام المعنى بالدراسة معزولاً فإن هذا القانون يظل نافعًا ومفيدًا فى حالات كثيرة . فمثلاً ، عند تصادم سيارتين سوف يسبب تزحلق العجلات على الطريق الرصوف ظهور قوى خارجية غير متزنة تؤثر على النظام المكون من السيارتين . وعادة تكون القوى التى تؤثر بها إحدى السيارتين على الأخرى حتى فى هذه الحالة أكبر كثيرًا من قوى التزحلق المؤثرة على الطريق . وعليه فإن التغيرات الكبيرة فى كمية التحرك التى تحدث فى لحظة التصادم تنشأ كلها تقريبًا كنتيجة للقوة التى تؤثر بها إحدى السيارتين على الأخرى . وهكذا فإن قانون بقاء كمية التحرك الخطى ما زال من الممكن تطبيقه على النظام المكون من السيارتين فى لحظة التصادم بالرغم من أن النظام ليس معزولاً تمامًا .

عند تطبيق قانون بقاء كمية التحرك يجب أن نتذكر أن كمية التحرك كمية متجهة ولتوضيح أهمية ذلك ، لنرجع إلى الشكل 6-6 . إذا أخذنا اتجاه المحور x اتجاها موجبًا ، يمكن كتابة كمية التحرك الكلية قبل التصادم (شكل 6-6أ) على الصورة :

$$\text{كمية التحرك قبل التصادم} = m_1 \mathbf{v}_{10} - m_2 \mathbf{v}_{2f}$$

$$= (2\ \text{kg})(6\ \text{m/s}) + (3\ \text{kg})(-4\text{m/s})$$

$$= 12 - 12 = 0$$

حيث $\mathbf{v}_{20}$ سالبة إذ أن $\mathbf{v}_{20}$ فى الاتجاه السالب للمحور x . وبالرغم من أن كلاً من الجسمين كان له كمية تحرك قبل التصادم فإن كمية التحرك الكلى للنظام صفر . هذه بالطبع حالة خاصة جدًا تم اختيارها لأنها توضح بطريقة درامية مثيرة أن كمية التحرك كمية متجهة . ومع ذلك فإن هذه الحالة الخاصة التى تكون فيها كمية التحرك الكلى صفرًا لها أهميتها من نواح متعددة أخرى .

ماذا يحدث بعد التصادم ؟ يخبرنا قانون بقاء كمية التحرك الخطى أن كمية تحرك هذا النظام المعزول لا تتغير نتيجة للتصادم . وعليه ، لابد أن تكون كمية التحرك بعد التصادم صفرًا فى هذه الحالة ، ولإثبات ذلك يمكن استخدام الطريقة الموضحة بالشكل 6-6ب . لاحظ أن مقدار كمية تحرك كل من الجسمين 9 kg.m/s ، ولكن كمية التحرك موجبة لأحد الجسمين وسالبة للآخر . هذا بالتأكيد أحد الحلول الممكنة للمسالة لأن كمية التحرك محفوظة . ومع ذلك فلنا الحق أن نتساءل عما إذا كان هذا هو الحل الوحيد للمسألة .

من السهل إثبات أن الحل الموضح فى الشكل 6-6ب ليس ما يحدث فى حالة خاصة معينة . لنفرض أن أحد الجسمين يحمل قطعة من العلك (اللبان) ملتصقة على الجانب الذى يحدث فيه التصادم . إذا كان العلك لزجًا بدرجة كافية فإن الجسمين سوف يلتصقان معًا بعد التصادم . ماذا يمكن أن يفعله الجسمان بعد التصاقهما معًا ؟

طبقًا لقانون بقاء كمية التحرك هناك إجابة واحدة فقط فى هذه الحالة . فحيث أن كمية تحرك النظام قبل التصادم تساوى صفرًا فإنها يجب أن تظل صفرًا بعد التصادم . ولكن حيث أن الجسمين قد التصقا الآن معًا فإنهما يجب أن يتحركا كوحدة واحدة وأن تكون سرعتاهما فى نفس الاتجاه . وإذا لم تكن السرعة النهائية للجسمين صفرًا فإن كمية التحرك بعد التصادم لا يمكن أن تكون صفرًا كما يتطلب قانون بقاء كمية التحرك . إذن ، عند تصادم الجسمين فى هذه الحالة فإنهما سوف يلتصقان معًا ويتوقفان نهائيًا عن الحركة . ونتيجة لذلك سوف تفقد طاقة حركة الجسمين المتصادمين فى هذه الحالة أثناء التصادم ، حيث يظهر الجزء الأكبر من طاقة الحركة المفقودة فى صورة طاقة حرارية لقطعة العلك .

الموقف المبين فى الشكل 6-6 يوضح فرقًا هامًا بين بقاء كمية التحرك الخطى وبقاء الطاقة . فطاقة الحركة وحدها ليس من الضرورى أن تظل محفوظة لأن هناك أنواعًا كثيرة من الطاقة يمكن أن تتحول إليها طاقة الحركة بحيث تظل طاقة الحركة الكلية

محفوظة ، ولكن هناك نوعًا واحدًا فقط من كمية التحرك الخطى ، وبذلك لا يمكن أن يتحول إلى صورة أخرى . وهكذا فإن بقاء كمية التحرك الخطى ينطبق دائمًا على الأنظمة المعزولة ، ولكننا لا يمكن أن نقول ذلك عن طاقة الحركة .

مثال 6-2 :

الشكل 7-6 يمثل تصادم شاحنة كتلتها 3.00×10^4 kg متحركة بمعدل قدره 10.0 m/s مع سيارة كتلتها 1200 kg تتحرك فى الاتجاه المضاد بسرعة مقدارها 25.0 m/s . فـإذا التصقت السيارتان بعد التصادم ، فبأى سرعة وفى أى اتجاه تتحركان ؟

استدلال منطقى :

سؤال : مم يتكون النظام المعزول فى هذا الموقف ؟

الإجابة : طبقًا للمناقشة السابقة يمكن إهمال القوى المتبادلة بين الطريق والسيارة وبين الطريق والشاحنة بالنسبة للقوى المتولدة نتيجة للتصادم . وعليه يمكن معاملة السيارة والشاحنة كنظام معزول أثناء التصادم .

سؤال : ما هو المبدأ الذى ينطبق على التصادم ؟

الإجابة : قانون بقاء كمية التحرك الخطى . ولكن لا يمكن افتراض أن طاقة الحركة محفوظة لأن مثل هذا المبدأ غير موجود .

سؤال : ما قيمة كمية تحرك النظام قبل التصادم ؟

الإجابة : باعتبار أن اتجاه سرعة الشاحنة موجبًا ، نجد أن :

$$(\mathbf{P}_i)_{truck} = (3.00 \times 10^4 \text{ kg})(+10.0 \text{ m/s}) = +3.00 \times 10^5 \text{ kgm/s}$$

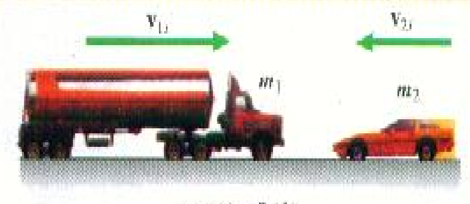
$$(\mathbf{P}_i)_{car} = (1.20 \times 10^3 \text{ kg})(-25.0 \text{ m/s}) = -3.00 \times 10^4 \text{ kgm/s}$$

$$= -0.300 \times 10^5 \text{ kgm/s}$$

إذن :

$$(\mathbf{P}_i)_{tot} = +2.70 \times 10^5 \text{ kgm/s}$$

سؤال : ما معادلة كمية التحرك الخطى بعد التصادم ؟



(أ) قبل التصادم



(ب) بعد التصادم

شكل 7-6 :

كمية التحرك محفوظة فى هذا التصادم بالرغم من أن طاقة الحركة غير محفوظة . أين ذهب الجزء الأعظم من طاقة الحركة فى رأيك ؟

الإجابة : السيارة والشاحنة قد التصقا معًا بعد التصادم ، وعليه فإن لـهما نفس السرعة $\mathbf{v}_f$. وحيث أن الكتلة تساوى مجموعة كتلتيهما ، إذن :

$$(\mathbf{P}_f)_{tot} = (3.00 \times 10^4 \text{ kg} + 12.0 \times 10^3 \text{ kg})\mathbf{v}_f = (3.12 \times 10^4 \text{ kg})\mathbf{v}_f$$

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها بتطبيق قانون بقاء كمية التحرك ؟

الإجابة : $(3.12 \times 10^4 \text{ kg})\mathbf{v}_f = +2.70 \times 10^5 \text{ kgm/s}$

الحل والمناقشة : بحل المعادلة السابقة بالنسبة إلى $\mathbf{v}_f$ نحصل على :

$$\mathbf{v}_f = \frac{2.70 \times 10^5 \text{ kgm/s}}{3.12 \times 10^4 \text{ kg}} = +8.65 \text{ m/s}$$

الإشارة + تعنى أن الحطام يتحرك فى نفس اتجاه الشاحنة . من الطبيعى أن هذه القيمة تمثل مقدار السرعة بعد التصادم مباشرة ، ولكن قوى الاحتكاك سوف تسبب تناقصها إلى أن يصل الحطام إلى السكون . تذكر أيضًا أن السيارة والشاحنة « تضرب » إحداهما الأخرى بنفس القوة . وحيث أن كتلة السيارة أصغر من الشاحنة فإن التغير فى سرعتها سيكون أكبر مما فى حالة الشاحنة .

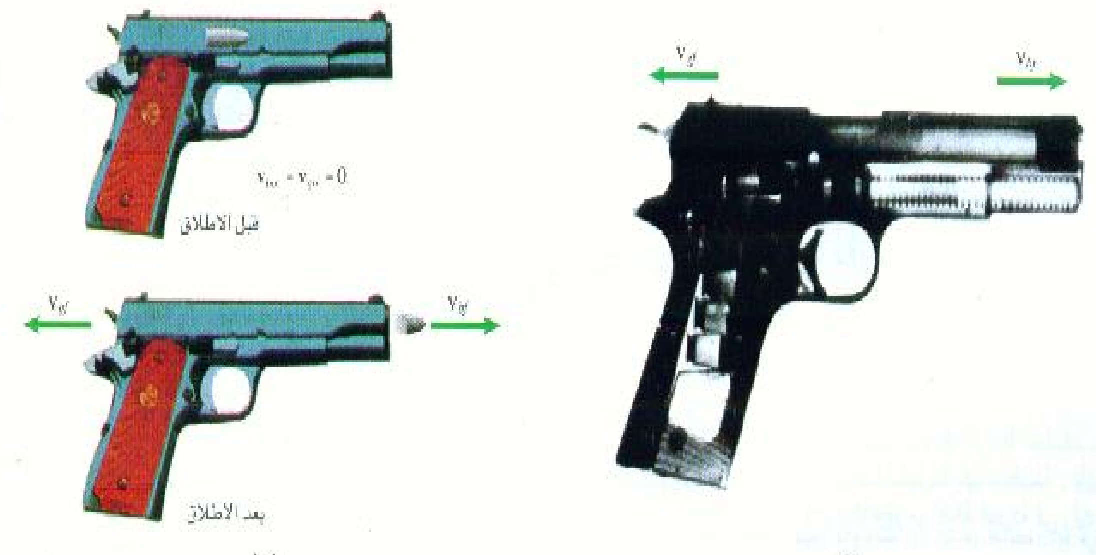
تمرين : أوجد التغير فى كمية تحرك كل من السيارة والشاحنة . **الإجابة** :

$$\Delta P_{car} = +4.04 \times 10^4 \text{ kg m/s}, \Delta P_{truck} = -4.04 \times 10^4 \text{ kg m/s}$$

مثال 3-6 :

يمثل الشكل 8-6أ صورة بالأشعة السينية لمسدس بعد انطلاق رصاصة مباشرة . (يمكنك أن ترى الرصاصة فى ماسورة المسدس إذا أمعنت النظر) . تسبب الغازات الساخنة الناتجة عن انفجار البارود تسارع الجزء المقذوف من الرصاصة فى ماسورة المسدس إلى الخارج . فإذا كانت M كتلة المسدس ، m كتلة الرصاصة ، وكانت $\mathbf{v}_{bf}$ سرعة خروج الرصاصة ، أوجد سرعة ارتداد المسدس .

شكل 8-6 : كمية تحرك المسدس قبل إطلاقه تساوى صفرًا ، وعليه فإن مجموع كميتى التحرك لابد أن يساوى صفرًا بعد إطلاق المسدس (هيوليت - باكارد) .



١

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو النظام الممكن اختياره كنظام معزول ؟

الإجابة : المسدس والرصاص بداخله يمثل نظامًا معزولاً بالرغم من أنه محمول فى اليد . فى لحظة إطلاق المسدس تكون القوى المتولدة نتيجة لانفجار البارود أكبر كثيرًا من القوة التى تؤثر بها اليد على النظام . والمطلوب هو إيجاد سرعة الارتداد عند هذه اللحظة .

سؤال : ما هى الكمية الفيزيائية المحفوظة أثناء الانفجار ؟

الإجابة : ينطبق هنا قانون بقاء كمية التحرك الخطى ، بالرغم من أن الانفجار يؤدى إلى خلق طاقة حركة . ذلك أن كمية التحرك الخطى يجب أن تكون دائمًا محفوظة طالما لم تؤثر على النظام قوى خارجية .

سؤال : ما قيمة كمية تحرك النظام قبل إطلاق المقذوف ؟

الإجابة : صفر ، لأن المسدس والرصاص فى حالة سكون .

سؤال : ما معادلة كمية التحرك بعد الإطلاق مباشرة ؟

الإجابة : باستخدام التمثيل الاتجاهى :

$$\mathbf{P}_{tot} = M\mathbf{v}_{gf} + m\mathbf{v}_{bf}$$

سؤال : على أى معادلة نحصل نتيجة لتطبيق قانون بقاء كمية التحرك الخطى ؟

الإجابة : بمساواة كميتى التحرك الخطى قبل الإطلاق وبعده نجد أن :

$$M\mathbf{v}_{gf} + m\mathbf{v}_{bf} = 0$$

الحل والمناقشة : بحل المعادلة جبريًا نجد أن سرعة ارتداد المسدس هى :

$$\mathbf{v}_{gf} = -\frac{m}{M}\,\mathbf{v}_{bf}$$

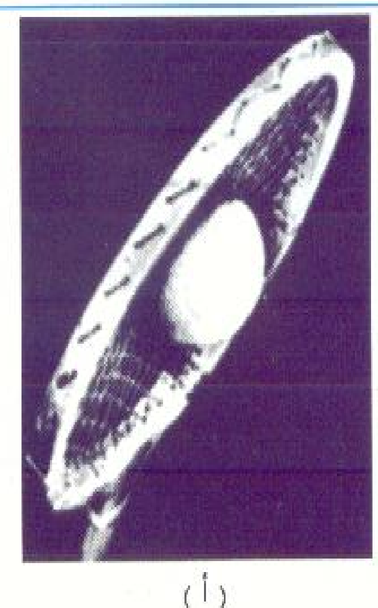
الإشارة السالبة تبين أن اتجاه الارتداد مضاد لاتجاه حركة الرصاصة . كلما زادت كتلة المسدس كلما قل مقدار سرعة ارتداده .

تمرين : ما مقدار سرعة ارتداد بندقية كتلتها 2 kg عند إطلاقها لرصاصة كتلتها 7 g من الفوهة بسرعة مقدارها $500\ m/s^2$ ؟ . **الإجابة :** 1.75 m/s .

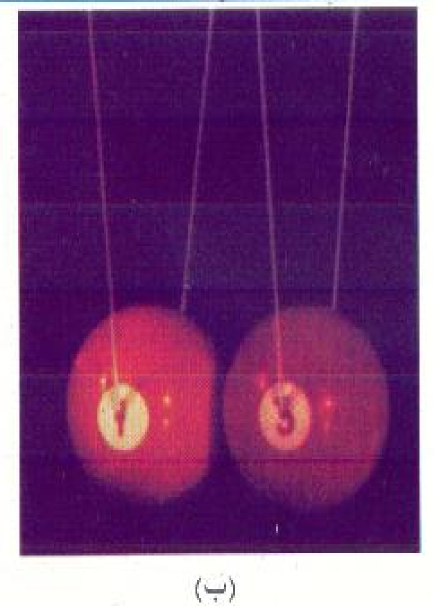
6-4 التصادمات المرنة وغير المرنة

تفقد طاقة الحركة فى تصادمات كثيرة . فمثلاً ، عند تصادم الجسمين فى الموقف المبين بالشكل 6-6جـ فإنهما يسكنان بعد التصادم وتتحول طاقة حركتهما كلها إلى بعض صور الطاقة الأخرى عند التصادم . وبالمثل فعند تصادم سيارتين يفقد جزء من طاقة حركتهما الأصلية أثناء بذل الشغل فى تشويه السيارتين . ويسمى أى تصادم تفقد أثناءه طاقة الحركة **بالتصادم غير المرن** .

التصادم غير المرن هو تصادم تفقد خلاله طاقة الحركة .



(أ)



(ب)

(أ) مثال لتصادم غير مرن . لاحظ تشوه كرة التنس (ب) تصادم مرن : التصادم لا يشوه سطحى كرتى البلياردو بدرجة محسوسة .

فى حالات خاصة معينة لا تفقد أى طاقة تقريبًا أثناء التصادم . وفى هذه الحالة ، عندما لا يحدث أى فقد لطاقة الحركة ، يقال أن **التصادم مرن تمامًا** (أو تام المرونة) . فالتصادم بين الكرات الصلدة ، ككرات البلياردو ، تصادم تام المرونة تقريبًا . كذلك فإن تصادم الجزيئات والذرات والجسيمات دون الذرية لا ينتج عنه أى فقد فى طاقة الحركة ، ولذا فإنها تصادمات مرنة تمامًا .

التصادم تام المرونة هو تصادم تكون طاقة الحركة فيه محفوظة .

مثال 4-6 :

يمثل الشكل 9-6 تصادم كرة كتلتها 40 g تتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها 30 cm/s وتتصادما تصادمًا مستقيمًا (مباشرًا) مع كرة أخرى ساكنة كتلتها 80 g . إذا كان التصادم تام المرونة ، ما سرعة كل من الكرتين بعد التصادم ؟ (نعنى بكلمة « مباشر » أو « مستقيم » أن الحركة تحدث كلها فى خط مستقيم) .

استدلال منطقى :

سؤال : ما معنى المصطلح « تام المرونة » ؟

الإجابة : هذا يعنى أن كمية التحرك النظام المكون من الكرتين وطاقة حركته محفوظتان أثناء التصادم .

سؤال : ما قيمة كمية التحرك قبل التصادم ؟

الإجابة : الكرة 2 ساكنة وبذلك تكون كمية تحركها صفرًا . أى أن كمية التحرك الكلية للنظام تساوى كمية التحرك الابتدائية للكرة 1 :

$$(\mathbf{P}_{tot})_i = m_1\mathbf{v}_{1i} = (0.040 \text{ kg})(0.30 \text{ m/s}) = 0.012 \text{ kg m/s}$$

حيث يشير الدليل السفلى i للقيم الابتدائية . بالرجوع إلى الشكل 9-6 يمكننا أن نرى

$V_{1i} = 30$ cm/s   40 g   80 g $V_{2i} = 0$

شكل 9-6 :
إذا كان التصادم المستقيم تصادمًا تام المرونة ، فما هما سرعتا الكرتين بعد التصادم ؟

اتجاه هذا المتجه إلى اليمين (الإشارة الموجبة = إلى اليمين) .

سؤال : ما معادلة كمية التحرك بعد التصادم ؟

الإجابة : باستعمال الحرف f كرمز للقيم النهائية ، إذن :

$$(\mathbf{P}_{tot})_f = (0.40\ \text{kg})\mathbf{v}_{1f} + (0.080\ \text{kg})\ \mathbf{v}_{2f}$$

سؤال : كيف نعلم أن هذه الإشارات صحيحة ؟

الإجابة : إننا لا نعلم ذلك حتى الآن لأننا أعطينا كلا الحدين فى الطرف الأيمن من المعادلة إشارة موجبة ، بمعنى أن هذه المعادلة تفترض أن الكرتين ستتحركان إلى اليمين . وبالنسبة إلى الكرة 1 فهى قد تتباطأ وتستمر فى الحركة إلى اليمين أو ترتد إلى اليسار .

سؤال : كيف نستطيع أن نعلم أى هاتين الحالتين هما ما يحدثان فعلاً ؟

الإجابة : إذا حصلنا على قيمة موجبة للسرعة $\mathbf{v}_{1f}$ يكون اختيارنا صحيحًا ، وإذا كانت سالبة فإن هذا يعنى أن الكرة 1 تتحرك فى الاتجاه المضاد ، أى إلى اليسار . أسوأ ما سوف يحدث إذن ، بصرف النظر عن اختيارنا للاتجاه الموجب ، هو أننا سنحصل على عدد سالب .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من قانون بقاء كمية التحرك الخطى ؟

الإجابة : $(\mathbf{P}_{tot})_i = (\mathbf{P}_{tot})_f$ ومنها نجد أن :

$$0.012\ \text{kg m/s} = (0.040\ \text{kg})(\ \mathbf{v}_{1f} - 2\mathbf{v}_{2f}\ )$$

سؤال : حيث أن لدينا مجهولان ، نحن فى حاجة إلى معادلة ثانية . ما هو المبدأ الآخر الممكن تطبيقه ؟

الإجابة : يفيدنا نص المسألة أن التصادم تام المرونة ، وذلك يعنى أن طاقة الحركة محفوظة . إذن يمكن القول أن :

$$\frac{1}{2}(0.40\ \text{kg})(0.30\ \text{m/s})^2 + 0 = \frac{1}{2}(0.040\ \text{kg})(\mathbf{v}_{1f})^2 + \frac{1}{2}(0.080\ \text{kg})\ (\mathbf{v}_{2f})^2$$

أو

$$0.090\ \text{m}^2/\text{s}^2 = 2v_{2f}^2 + v_{1f}^2$$

الحل والمناقشة : يمكن حل هاتين المعادلتين بإيجاد $\mathbf{v}_{1f}$ بدلالة $\mathbf{v}_{2f}$ أولاً من معادلة كمية التحرك . لنحذف الوحدات مؤقتًا من المعادلة للتبسيط :

$$\mathbf{v}_{1f} = 0.30 - 2\ \mathbf{v}_{2f}$$

وبتربيع الطرفين :

$$v_{1f}^2 = 0.090 - 1.2v_{2f} + 4v_{2f}^2$$

والآن لنعوض عن هذه الكمية فى معادلة طاقة الحركة :

$$2v_{2f}^2 + (0.090 - 1.2\ v_{2f} + 4v_{2f}^2\ ) = 0.090$$

وبتجميع الحدود نحصل على :

$$6v_{2f}^2 - 1.2\, v_{2f} = 0$$

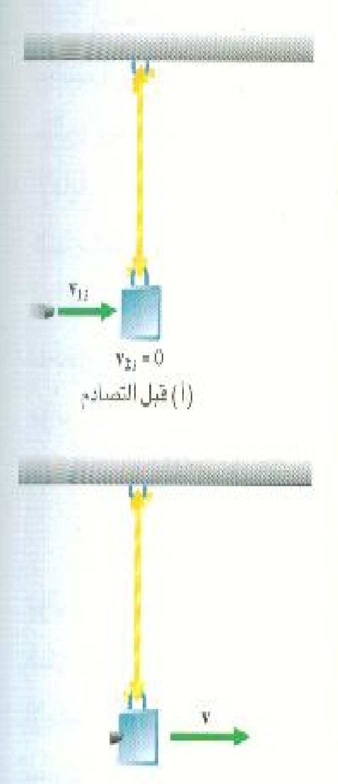
هذه المعادلة التربيعية لها حلان هما $v_{2f} = 0$ و $v_{2f} = 0.20\ \text{m/s}$. بالتعويض بهاتين القيمتين فى معادلة كمية التحرك نجد أن :

$$v_{1f} = -1.10\ \text{m/s} \qquad \text{و} \qquad v_{1f} = 0.30\ \text{m/s}$$

الزوج الأول من الإجابات ($v_{2f} = 0$ ، $v_{1f} = 0.30\ \text{m/s}$) يعنى أن الكرة 1 تستمر فى الحركة إلى اليمين مخترقة الكرة 2 الساكنة . هذا حل ممكن **رياضيًا** ولكنه بالطبع مستحيل **فيزيائيًا** . أما الحل الآخر ، وهو الصحيح ، فيبين أن الكرة 1 ترتد إلى الخلف بعد التصادم وتتحرك إلى الشمال بسرعة مقدارها 0.10 m/s أما الكرة 2 فتستمر فى الحركة إلى اليمين بسرعة قدرها 0.20 m/s .

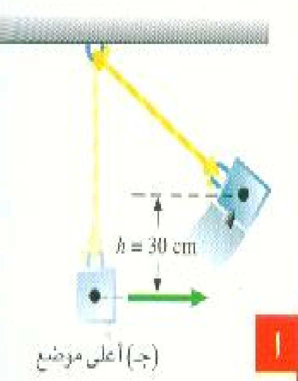
سوف نقابل كثيرًا من الأمثلة التى تعطينا فيها المعادلات الرياضية حلولاً ليس لها معنى فيزيائى . مهمتنا فى هذه الأحوال أن نقوم بدراسة الموقف الفيزيائى بعناية لنختار الحلول التى لها معنى فيزيائى مقبول . فمثلاً ، قد يكون أحد حلى معادلة تربيعية لزمن طيران مقذوف سالبًا . إذا كنا قد افترضنا فى الحل أن إطلاق المقذوف قد حدث فى اللحظة $t = 0$ يكون من الواضح أن الزمن السالب ليس له معنى فيزيائى ، ويكون الحل الموجب للزمن t هو الصحيح فيزيائيًا .

تمرين : ما يحدث إذا كانت الكرتان متساويتى الكتلة m ؟ **الإجابة** : **سوف يتبادلان سرعتيهما .**



مثال 6-5 :

أطلقت رصاصة كتلتها 10 g بسرعة غير معلومة على قالب خشبى كتلته 2.00 kg معلق فى خيط متدل من السقف فاخترقته واستقرت بداخله (شكل 10–6) . وبعد التصادم تأرجح القالب بالرصاصة إلى ارتفاع قدره 30 cm فوق الموضع الأفقى . ما مقدار سرعة الرصاصة قبل التصادم ؟ (هذا الجهاز يسمى البندول الأفقى) .



شكل 10–6 :(جـ) أعلى موضع كمية التحرك هى نفسها فى (أ) و (ب) ، ولكن ليس فى (جـ) . عند الانتقال من (ب) إلى (جـ) تتحول طاقة الحركة إلى طاقة جهد تثاقلى .

استدلال منطقى :

سؤال : هل طاقة الحركة محفوظة فى هذا الموقف ؟

الإجابة : يمكن القول أنها **غير محفوظة** لأن التصاق الرصاصة بالقالب معناه أن التصادم غير مرن .

سؤال : هل كمية التحرك محفوظة ؟

الإجابة : إذا كان النظام معزولاً فكمية التحرك محفوظة دائمًا . ومن الواضح أن النظام

المعزول هنا هو الرصاصة مع القالب الخشبى فى لحظة التصادم (بالرغم من أن هذا النظام ليس معزولاً حقيقة بسبب وجود قوى الجاذبية المؤثرة عليه والشد فى الخيط فإن هذه القوى تتلاشى رأسيًا فى لحظة التصادم . هذا ليس صحيح فى أى لحظة تالية ، أثناء تأرجح البندول ، ولا تكون كمية التحرك محفوظة) .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من قانون بقاء كمية التحرك الخطى ؟

الإجابة : لحل هذه المسألة جبريًا لنفرض أن كتلة الرصاصة m وكتلة القالب M وبتطبيق قانون بقاء كمية التحرك الخطى نجد أن :

$$mv_{1i} + 0 = (m + M)V$$

حيث v_{1i} مقدار سرعة الرصاصة قبل التصادم ، V سرعة المجموعة (الرصاصة مع القالب) بعد التصادم . لاحظ أن السرعتين مجهولتان كلتاهما .

سؤال : كيف يرتبط الارتفاع بالسرعتين المذكورتين ؟

الإجابة : القوة الوحيدة المؤثرة على النظام بعد التصادم هى قوة الجاذبية . إذن طبقًا لنظرية الشغل والطاقة ، حيث $\Delta TE = 0$ و $W_{net} = 0$ فى هذه الحالة ، تتحول طاقة الحركة التى يكتسبها القالب بعد التصادم مباشرة إلى GPE عند قمة المسار .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من نظرية الشغل والطاقة ؟

الإجابة : $\frac{1}{2}(m+M)V^2 = (m+M)gh$

لاحظ أن هذه المعادلة تحتوى على مجهول واحد هو V .

الحل والمناقشة : نوجد V من المعادلة الأخيرة :

$$V = (2gh)^{1/2} = [2(9.8\ m/s^2)(0.30\ m)]^{1/2} = 2.4\ m/s$$

بالتعويض عن V بهذه القيمة فى معادلة كمية التحرك نحصل على v_{1i} :

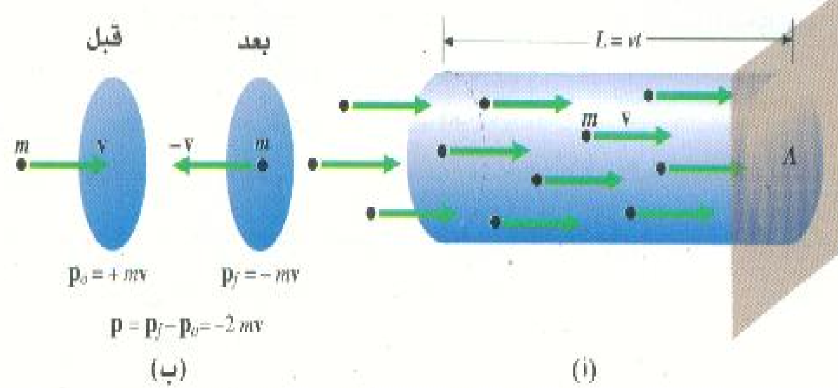
$$v_{1i} = \frac{(2.000 + 0.010\ kg)(2.4\ kg)}{0.010\ kg} = 490\ m/s$$

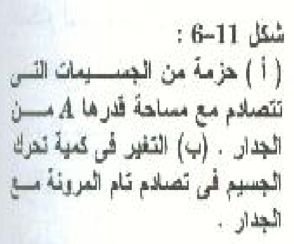
مثال 6-6 :

لنفرض أن لدينا حزمة من الجسيمات كتلة كل منها m ومقدار سرعتها v ، وأن هذه الجسيمات تصطدم عموديًا بجدار صلد كما هو مبين بالشكل 6-11أ ، ولنعتبر أن جميع التصادمات مرنة مرونة تامة . لنفرض أيضًا أن عدد الجسيمات فى المتر المكعب من الحزمة n وأن مساحة مقطع الحزمة A . باستخدام صورة قانون نيوتن الثانى مصاغًا بدلالة كمية التحرك ، أوجد تعبيرًا للقوة المتوسطة التى تؤثر بها هذه الحزمة على الجدار .

استدلال منطقى :

عند سقوط الجسيم على الجدار سوف يرتد الجسيم فى تصادم تام المرونة .





شكل 11-6 :
(أ) حزمة من الجسيمات التى تتصادم مع مساحة قدرها A من الجدار . (ب) التغير فى كمية تحرك الجسيم فى تصادم تام المرونة مع الجدار .

ولكى يحدث هذا الارتداد لابد أن يؤثر الجدار بقوى معينة على الجسيم ، وطبقاً لقانون نيوتن الثالث ، لابد أن يؤثر الجسيم على الجدار بقوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه . ومن ثم فإن متوسط القوة المؤثرة على الجدار خلال زمن معين t تساوى عدد التصادمات الحادثة فى هذا الزمن مضروبة فى التغير فى كمية التحرك فى التصادم الواحد .

سؤال : ما معنى « تام المرونة » هنا ؟

الإجابة : هذا يعنى أن طاقة الحركة KE لا تتغير . وبما أن الجدار لا يتحرك أو يتشوه (لأن كتلته مالا نهاية أساساً بالمقارنة بكتلة الجسيمات) فإن طاقة حركته تساوى الصفر . معنى ذلك أن طاقة الحركة الكلية هى طاقة حركة الجسيمات وحدها ؛ ومن ثم فعندما يضرب الجسيم الجدار بسرعة مقدارها v فإنه لا بد أن يرتد إلى الخلف بنفس السرعة . تذكر أن KE كمية غير متجهة ؛ وذلك يعنى أن طاقة حركة الجسيم بعد التصادم تظل هى نفسها قبل التصادم .

سؤال : إذن ، ما قيمة التغير فى كمية تحرك أى جسيم أثناء التصادم ؟

الإجابة : واضح من الشكل 11-6ب أن كمية تحرك أى جسيم قبل التصادم $+m\mathbf{v}$ وبعد التصادم $-m\mathbf{v}$. وعليه ، **التغير** فى كمية التحرك (تذكر أنه **كمية متجهة**) يكون :

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p}_f - \mathbf{p}_0 = (-m\mathbf{v}) - (+m\mathbf{v}) = -2m\mathbf{v}$$

تذكر كذلك أن اتجاه القوة المسببة لتغير كمية التحرك هو نفس اتجاه هذا التغير . وفى هذه الحالة $\Delta\mathbf{p}$ سالب ، وبذلك يكون اتجاه $\Delta\mathbf{p}$ ، ومن ثم اتجاه القوة المؤثرة على الجسيم ، **إلى اليسار** ، وتكون القوة التى يؤثر بها الجسيم على الجدار **إلى اليمين** .

سؤال : ما عدد التصادمات التى تحدث فى الثانية ؟

الإجابة : من الشكل 11-6أ يتضح لنا أن كل الجسيمات الموجودة فى أسطوانة طولها $L = vt$ سوف تتصادم مع الجدار خلال الزمن t . حجم هذه الأسطوانة هو $AL = Avt$. وحيث أن n هو عدد الجسيمات لكل متر مكعب ، فإن عدد التصادمات التى تحدث خلال لزمن t هو :

$$N = nAL = nAvt$$

وعليه فإن عدد التصادمات فى الثانية يكون $N/t = nAv$.

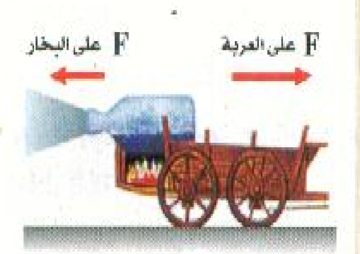
الحل والمناقشة : إذن ، مقدار متوسط القوة التى تؤثر بها الحزمة على الجدار هو :

$$\overline{F} = +(2mv)(nAv) = 2mv^2nA$$

تعرف القوة **لوحدة المساحة** بالضغط (P) :

$$P = \frac{\overline{F}}{A} = 2mv^2n = 4(\mathrm{KE})n$$

حيث KE طاقة حركة الجسيم الواحد . هذا وسوف نستعمل فيما بعد ، فى الفصل العاشر ، نفس هذه الفكرة في اشتقاق تعبير للضغط الذى يؤثر بها غاز على جدار إناء .



شكل 12-6 :
عربة نفثية الدفع .

6-5 الصواريخ والدفع النفثي

بالرغم من أننا نعتقد أن الصواريخ والمحركات النفاثة أجهزة حديثة نسبيا ، إلا أن نيوتن كان يفهم مبدأ عملها تمامًا . بل أنه ابتكر نظام دفع نفثي كالمبين بالشكل 12-6 وشرح كيف ينطبق قانون بقاء كمية التحرك عليه . وفى هذا النظام يندفع البخار المتكون فى غلاية الماء بسرعة عالية من الجزء الخلفى للمحرك ، ويكون اتجاه كمية تحرك البخار إلى الخلف . وحيث أن كمية التحرك الابتدائية للماء والمحرك صفر ، فإن العربة والمحرك لابد أن يتحركا الآن (أى يرتدا) فى الاتجاه الأمامى بكمية تحرك تساوى كمية تحرك البخار الخارج فى المقدار وتضادها فى الاتجاه .



يستمد الصاروخ دفعه من الغازات المنطلقة بسرعة عالية جدًا من فوهة (منفث) الصاروخ . كمية تحرك هذه الغازات إلى الخلف تساوى كمية التحرك التى يكتسبها مكوك الفضاء إلى الأمام .

وفى كل أنواع الصواريخ والمحركات النفاثة الحديثة يحترق الوقود وتتكون نتيجة لذلك غازات ساخنة جدًا ، وتنطلق هذه الجزيئات الغازية المتحركة بسرعة عالية جدًا من مؤخرة المحرك مثل تيار من الرصاصات المنطلقة من بندقية تكرارية ذات سرعة خيالية . وكما أن البندقية ترتد فى عكس اتجاه حركة الرصاصة المنطلقة ، فإن الصاروخ والطائرة النفاثة ترتدان أيضًا فى الاتجاه المعاكس لحركة الغاز المنطلق . وحيث أن جزيئات الغاز قد اكتسبت كمية تحرك اتجاهها إلى الخلف فإن الصاروخ يجب أن يكتسب كمية تحرك مساوية فى الاتجاه المعاكس (إلى الأمام) لأن كمية التحرك محفوظة :

يبين الفحص الدقيق لهذا النوع من أنظمة الدفع النفثي أن داخل المحرك يوجه الجزيئات الغازية الساخنة بحيث تنطلق مندفعة إلى الخلف أساسًا . ولكن طبقًا لقانون نيوتن الثالث (قانون الفعل ورد الفعل) تبذل هذه الجزيئات قوة فى الاتجاه الأمامى على المحرك ، دافعة الصاروخ بذلك إلى الأمام . هاتان القوتان تحدثان فى داخل المحرك نفسه ، ولا تؤثر على السفينة الفضائية أى قوة من الخارج . وهذا يوضح أن السفينة لا تندفع نتيجة للفعل المتبادل بين الغازات الساخنة والمحيط الجوى الخارجى . والحقيقة أن أداء الصاروخ يكون فى أحسن حالاته فى الفضاء الخارجى حيث لا وجود للهواء . ذلك أن الهواء يتسبب فى نشأة قوة احتكاك تعوق حركة الصاروخ ، ومن ثم فإنه غير مرغوب فيه .

مثال 6-7 :

ارجع إلى البندقية المذكورة فى التمرين التالى للمثال 3-6 . إذا كانت هذه البندقية آلية يمكنها إطلاق 10 طلقات فى الثانية ، عين متوسط قوة الارتداد المؤثرة على البندقية خلال ثانية واحدة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يسبب قوة الارتداد هذه ؟

الإجابة : تتسارع الرصاصات منطلقة خارج ماسورة البندقية تحت تأثير القوى الناتجة عن انفجار البارود . وطبقًا لقانون نيوتن الثالث فإن الرصاصات بدورها يجب أن تؤثر على البندقية بقوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه .

سؤال : ما العلاقة بين هذه القوة وسرعة الرصاصات ؟

الإجابة : تبين المعادلة 4-6 أن متوسط القوة المؤثرة على الرصاصات مضروبة فى الزمن تساوى التغير فى كمية تحرك الرصاصات :

$$\bar{\mathbf{F}}t = \Delta \mathbf{p}_{\text{billets}}$$

سؤال : ما الزمن الذى يؤخذ متوسط القوة خلاله ؟

الإجابة : الزمن المناسب ، طبقًا لنص المسألة ، هو 1 s . وخلال هذا الزمن تكتسب كل رصاصة من العشرة كمية تحرك قدرها $(0.007 \text{ kg})(500 \text{ ms}) = 3.5 \text{ kg m/s}$. هذا يعنى أن التغير الكلى فى كمية تحرك الرصاصات فى كل ثانية يساوى 35 kg m/s .

الحل والمناقشة : ينتج مما سبق أن متوسط القوة المؤثرة على الرصاصات هو :

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{\Delta \mathbf{p}_{\text{bullets}}}{t} = \frac{35 \text{ kg m/s}}{1 \text{ s}} = 35 \text{ N} \quad \text{أو} \quad 7.9 \text{ lb}$$

ويكون متوسط القوة المؤثرة على البندقية مساويًا لهذه القيمة فى اتجاه الارتداد .

وكما ذكر آنفًا فإن المحركات الصاروخية والنفاثة تعمل طبقًا لهذا المبدأ ، ولكن هذه المحركات تطلق جزيئات الغاز بسرعات عالية جدًا بدلاً من الرصاصات المنفردة المنطلقة بمعدل منخفض نسبيًا . بناء على ذلك يمكن معاملة الغازات المنصرفة كمائع متصل منطلق بمعدل كتلى قدره ΔM فى زمن قدره Δt . هذا المائع ينطلق بسرعة قدرها سرعة العادم V_{ex} . ويمكننا كتابة قانون نيوتن الثانى فى صورة مناسبة بشكل خاص لهذا الموقف عندما **يكون معدل الكتلة المنصرفة ثابتًا :**

$$\mathbf{F}_{\text{thrust}} = \frac{\Delta \mathbf{p}_{\text{gas}}}{\Delta t} = \frac{\Delta(M_{\text{gas}} V_{\text{ex}})}{\Delta t} = \frac{\Delta M_{\text{gas}}}{\Delta t} V_{\text{ex}}$$

حيث ينتج الحد التالى علامة التساوى الثانية من تعريف كمية التحرك : $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$.

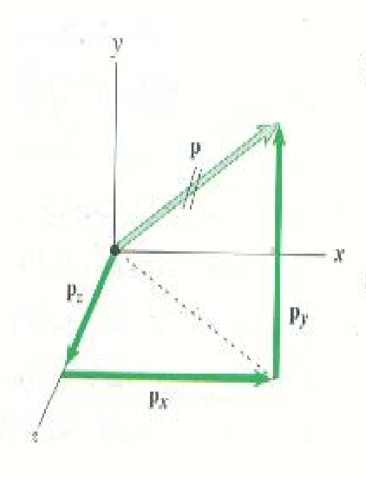
مثال توضيحى 3-6

يقذف صاروخ قنطورس Centaur rocket الغاز الساخن من محركه بمعدل قدره 1300 kg/s . فإذا كانت جزيئات الغاز تترك الصاروخ بسرعة مقدارها 50,000 m/s ، فما مقدار الدفع الذى يولده الصاروخ قنطورس ؟

استدلال منطقى : طبقًا لقانون نيوتن الثانى فى الصورة السابق اشتقاقها عاليه فإن الدفع يكون :

$$\mathbf{F}_{\text{thrust}} = \frac{\Delta M_{\text{gas}}}{\Delta t} V_{\text{ex}} = (1300\ \text{kg/s})(50{,}000\ \text{m/s})$$

$$= 65 \times 10^{6}\ \text{N}$$



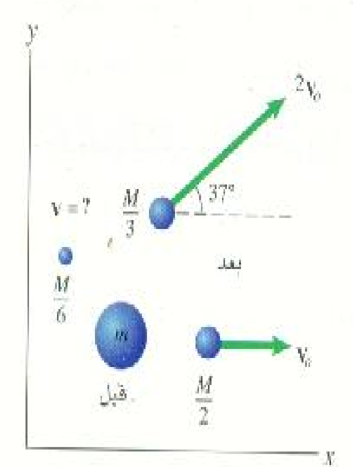
شكل 13-6 :
يمكن استبدال متجه كمية التحرك بمركباته .

أو حوالى 7000 ثقل طن ! ■

وتصمم معظم محركات الصواريخ بحيث يكون معدل احتراق الوقود ثابتًا ؛ ومن ثم فإن الدفع يظل ثابتًا مادام المحرك شغالاً . ومع استمرار احتراق الوقود وخروجه من الصاروخ فى صورة عادم غازى تقل الكتلة الكلية للصاروخ باستمرار . ونتيجة لذلك لن تظل عجلة الصاروخ ثابتة ، بل إنها سوف تزيد مع الزمن بالرغم من ثبوت الدفع . هذا مثال لقوة تؤثر على كتلة غير ثابتة .

6-6 بقاء كمية التحرك فى بعدين وثلاثة أبعاد

من المكن تحليل كمية التحرك ، كغيرها من الكميات المتجهة الأخرى ؛ إلى مركباتها المتعامدة بعد اختيار نظام الإحداثيات المناسب . ويوضح الشكل 13-6 تحليل المتجه **P** إلى مركباته فى الاتجاهات x ، y ، z على سبيل المثال . وإذا كان النظام معزولاً يمكننا تطبيق قانون بقاء كمية التحرك الخطى على **كل مركبة على حدة** . هذا يعنى فى الواقع أن بقاء كمية التحرك الخطى سوف يعطينا معادلتين فى المسألة ذات البعدين وثلاث معادلات فى المسألة ذات الأبعاد الثلاثة . وسنرى الآن كيف يمكن استخدام هذه المعادلات .



شكل 14-6 :
قنبلة ساكنة قبل الانفجار وشظاياها بعد أن انفجرت .

مثال 8-6 :

لنفرض أن قنبلة كتلتها M معلقة فى حالة السكون فى طرف حبل قد انفجرت إلى ثلاثة قطع . وكما هو واضح من الشكل 14-6 ، لوحظ أن نصف كتلة القنبلة $(M/2)$ قد تحرك بسرعة مقدارها v_0 فى الاتجاه الموجب للمحور x بعد الانفجار مباشرة ، وأن جزءًا آخر

كتلته $M/3$ قد تحرك بسرعة مقدارها $2v_0$ فى اتجاه يصنع زاوية قدرها $37°$ فوق الأفقى .
عين سرعة القطعة الثالثة وكتلتها $M/6$.

استدلال منطقى :

سؤال : ما المبدأ الذى ينطبق أثناء الانفجار ؟

الإجابة : حيث أن القنبلة معزولة فإن كتلتها محفوظة . وفى هذه المسالة ذات البعدين فإن هذا يعنى أن كلاً من مركبات كمية التحرك محفوظة .

سؤال : ما قيمة كمية التحرك الأصلية ؟

الإجابة : صفر فى الاتجاهين x و y .

سؤال : ما قيمة كل من مركبتى كمية التحرك بعد الانفجار ؟

الإجابة : لنفرض أن v_x ، v_y هما مركبتا سرعة القطعة الثالثة ، إذن :

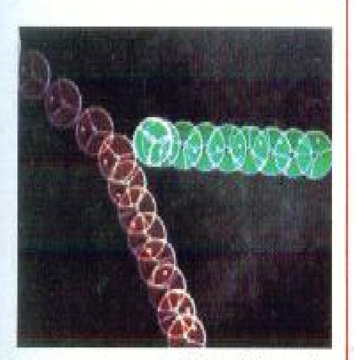
$$p_x = \frac{M}{6} v_x + \frac{M}{2} v_0 + \frac{M}{3} 2 v_0 \cos 37°$$

و :

$$p_y = \frac{M}{6} v_0 + \frac{M}{3} 2 v_0 \sin 37°$$

سؤال : ما هما المعادلتان اللتان نحصل عليهما من قانون بقاء كمية التحرك هنا ؟

الإجابة : حيث أن كمية التحرك الابتدائية كانت صفرًا فإن كـلاً من هاتين المركبتين تساوى صفرًا أيضًا .



بقاء كمية التحرك فى تصادم ذى بعدين . هل لديك وسيلة لمعرفة اتجاه حركة القرصين ، بفرض أن التصادم مرن ؟

الحل والمناقشة : بالنسبة للمركبة x نجد أن :

$$\frac{M}{6} v_x + \frac{M}{2} v_0 + \frac{M}{3} 2 v_0 \cos 37° = 0$$

لاحظ أن M قد اختصرت . هذه المعادلة تعطى :

$$\frac{v_x}{6} = -\left[\frac{v_x}{2} + \frac{2(0.8)\, v_0}{3}\right]$$

وبالنسبة للمركبة y :

$$\frac{M}{6} v_y + \frac{M}{3} 2 v_0 \sin 37° = 0$$

ومنه

$$v_y = -2.4\, v_0$$

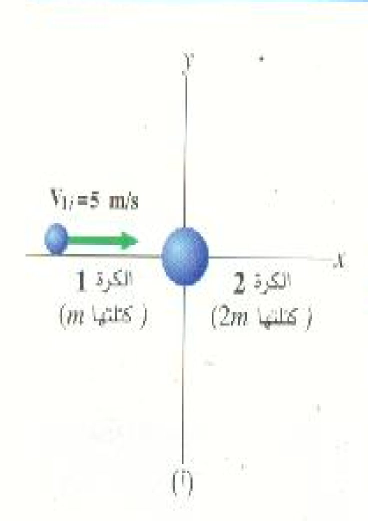
تبين الإشارة السالبة أن المركبتين فى الاتجاهين $-x$ و $-y$ ومقدار السرعة المجهولة v هو :

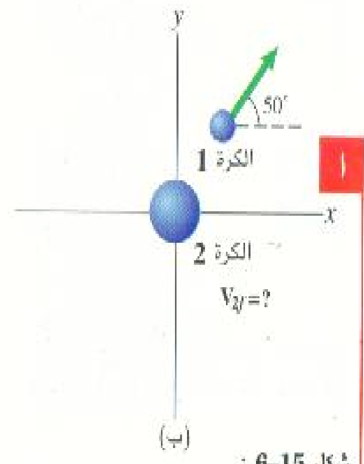
$$v = [(6.2)^2 + (2..4)^2]^{1/2}\, v_0 = 6.65\, v_0$$

ويعرف اتجاه سرعة القطعة الثالثة بالزاوية θ كما يأتى :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2.4}{6.2}\right) = 21.2^\circ$$

حيث θ مقاسة تحت المحور $x-$.





شكل 15-6 :
(أ) الكرتان قبل التصادم ، (ب) بعد التصادم . ماذا يحدث للكرة 2 بعد التصادم ؟

مثال 6-9 :

الكرة 1 فى الشكل 15-6أ كتلتها m وسرعتها 5 m/s . تصادمت هذه الكرة مع الكرة الساكنة 2 وكتلتها 2 m . وبعد التصادم تحركت الكرة 1 بسرعة مقدارها 2 m/s فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 50° بالنسبة إلى اتجاهها الأصلى كما هو مبين بالشكل 15-6ب .
(أ) ما سرعة الكرة 2 بعد التصادم ؟ (ب) وضح ما إذا كان التصادم مرنًا أو غير مرن . وإذا كان هناك فقد فى KE . فما النسبة المئوية لهذا الفقد ؟

استدلال منطقى الجزء (أ)

سؤال : إذا لم نكن نعلم نوع التصادم ، فكيف نتصرف ؟
الإجابة : من المستحيل معرفة نوع التصادم منذ البداية ، ولكن يفضل أن نفترض أن أى تصادم غير مرن ، ما لم ينص على غير ذلك . هذا يعنى ، بأسلوب آخر ، إنه لا يمكننا افتراض أن طاقة الحركة محفوظة عمومًا .
سؤال : مم يجب أن يتكون النظام المختار ؟
الإجابة : الكرتان تكونان نظامًا معزولاً لأن القوى المؤثرة الوحيدة تعمل بينهما فقط .
سؤال : ما المبدأ الواجب تطبيقه ؟
الإجابة : كمية التحرك محفوظة فى جميع الحالات ، ويمكن تطبيق هذا المبدأ على كل مركبة من مركبات كمية التحرك على حدة .
سؤال : ما قيمة كمية التحرك الابتدائية ؟
الإجابة : $\mathbf{P}_{0y} = 0$ و $\mathbf{P}_{0x} = m(5\ \text{m/s})$

سوف نعتبر أن الاتجاه إلى أعلى والاتجاه إلى اليمين موجبان .
سؤال : ما قيمة كمية التحرك النهائية ؟
الإجابة : كمية التحرك النهائية للكرة 1 هى :

$$\mathbf{P}_{1x} = m(2\ \text{m/s})\cos 50^\circ \quad \text{و} \quad \mathbf{P}_{1y} = m(2\ \text{m/s})\sin 50^\circ$$

وكمية التحرك النهائية للكرة 2 هى :

$$\mathbf{P}_{2x} = (2\,m)\mathbf{v}_{2x} \quad \text{و} \quad \mathbf{P}_{2y} = (2\,m)\mathbf{v}_{2y}$$

سؤال : ما هى المعادلات الناتجة من تطبيق قانون بقاء كمية التحرك ؟
الإجابة : فى الاتجاه x .

$$m(5 \text{ m/s}) = m(2 \text{ m/s}) \cos 50° + (2m)\mathbf{v}_{2x}$$

وفى الاتجاه y :

$$0 = m(2 \text{ m/s}) \sin 50° + (2m)\, \mathbf{v}_{2y}$$

الحل والمناقشة : لاحظ أن الكتلة m تختصر فى المعادلتين :

معادلة الاتجاه y تعطى :

$$\mathbf{v}_{2y} = \frac{-(2 \text{ m/s})(0.766)}{2} = -0.766 \text{ m/s}$$

ومن معادلة الاتجاه x نجد أن :

$$\mathbf{v}_{2x} = \frac{5 \text{ m/s} - (2 \text{ m/s})(0.6431)}{2} = +1.86 \text{ m/s}$$

وعليه فإن مقدار سرعة الكرة 2 يكون :

$$v_2 + [(-0.766)^2 + (1.86)^2]^{1/2} \text{ m/s} = 2.01 \text{ m/s}$$

أما اتجاه $\mathbf{v}_2$ فيعرف بدلالة الزاوية θ بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x كالتالى

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-0.766}{1.86}\right) = -22.4°$$

استدلال منطقى الجزء (ب)

سؤال : ما قيمة طاقة الحركة الابتدائية ؟

الإجابة : $(\text{KE})_i = \frac{1}{2} m(5 \text{ m/s})^2 = \frac{1}{2} m\, (25 \text{ m/s})^2$

سؤال : ما قيمة طاقة الحركة النهائية ؟

الإجابة :

$$(\text{KE})_f = \frac{1}{2}(2m)(2.01 \text{ m/s})^2 + \frac{1}{2} m\, (2 \text{ m/s})^2 = \frac{1}{2} m\, (12.1 \text{ m}^2/\text{s}^2)$$

سؤال : هل نحتاج الآن إلى معرفة الكتلة ؟

الإجابة : نعم إذا كان المطلوب حساب $\Delta(\text{KE})$ ، ولا إذا أردنا حساب الفقد النسبى فقط .

سؤال : ما صيغة الفقد النسبى فى KE ؟

الإجابة : $\dfrac{(\text{KE})_f - (\text{KE})_i}{(\text{KE})_i}$

الحل والمناقشة : بالتعويض بالقيم العديدة سنجد أن الفقد النسبى هو :

$$\frac{\frac{1}{2} m(12.1 - 25)}{\frac{1}{2} m(25)} = -\frac{12.9}{25} = -0.516$$

هذا يبين إذن أن التصادم غير مرن ، حيث تتحول نسبة قدرها 51.6 فى المائة من طاقة الحركة الأصلية إلى طاقة حرارية للكرتين .

6-7 كمية تحرك مركز الكتلة

يلعب مفهوم مركز كتلة النظام دورًا خاصًا فى كمية التحرك ، كما فى مواقف أخرى كثيرة . وقد استخدمنا مركز الكتلة سابقًا فى حالة الأجسام المتماثلة فقط ، ولكننا سنقوم الآن بتعريف مركز كتلة نظام مكون من عدد قدره N من الكتل النقطية فى بعدين . لنفرض أن هذه الكتل مقاديرها m_1 ، m_2، m_3 ، .... m_N

وأن إحداثياتها هى x_1 ، x_2، x_3 ، .... x_N و y_1 ، y_2، y_3 ، .... y_N .

يعرف الإحداثيات y و x لمركز كتلة هذا النظام بالمعادلتين :



عند لحظة الانفجار تتخذ شظايا الألعاب النارية تلك المسارات التى تضمن تساوى سرعة مركز كتلتها مع سرعة الألعاب النارية قبل الانفجار مباشرة .

$$X_{c.m.} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \ldots\ldots + m_N\, x_N}{m_1 + m_2 + \ldots\ldots + m_N} \tag{6-6}$$

$$= \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + \ldots\ldots + m_N\, x_N}{M_{tot}}$$

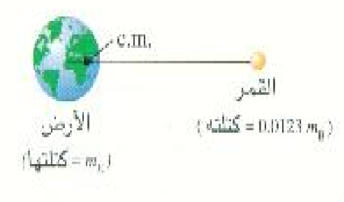
و :

$$Y_{c.m.} = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + \ldots\ldots + m_N\, y_N}{m_1 + m_2 + \ldots\ldots + m_N} \tag{6-7}$$

$$= \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + \ldots\ldots + m_N\, y_N}{M_{tot}}$$

مثال توضيحى 6-4 :

أوجد موضع مركز كتلة النظام المكون من الأرض والقمر . اعتبر أن المسافة بينهما 240,000 mi وأن كتلة القمر m_M تساوى 0123. من كتلة الأرض m_E .



شكل 6-16 :
مركز كتلة النظام المكون من الأرض والشمس .

استدلال منطقى : يمكن اعتبار أن المحور x هو الخط الواصل بين الأرض والقمر ، وبهذا تكون مسألتنا فى بعد واحد . علاوة على هذا إذا افترضنا أن الأرض والشمس جسمين كرويين سوف يقع مركز كل كتلة كل منهما فى مركزه الهندسى . وباعتبار أن الأرض تقع عند $x = 0$ سوف يقع القمر عند $x = 240{,}000$ mi ؛ وهذا مبين بالشكل 6-16 . وباستخدام معادلة تعريف مركز الكتلة سنجد أن مركز كتلة الأرض والشمس هو :

$$X_{c.m.} = \frac{m_M x_M + m_E x_E}{m_M + m_E}$$

$$= \frac{(0.0123)m_E\,(240{,}000\ \text{mi}) + m_E\,(0)}{1.0123 m_E}$$

$$= \frac{(0.0123)(240{,}000 \text{ mi})}{1.0123} = 2930 \text{ mi}$$

مقاسًا من مركز الأرض . وحيث أن نصف قطر الأرض 4000 mi تقريبًا ، فإن هذه النقطة تقع على بعد غير قليل تحت سطح الأرض ! ■

وإذا غيرت الكتل مواضعها فى نظام معين فإن إحداثيات مركز الكتلة سوف تتغير عمومًا نتيجة لذلك . ويمكننا كتابة هذه التعبيرات باستخدام المعادلتين 6-6 و 6-7 كالتالى :

$$\Delta X_{\text{c.m.}} = \frac{m_1 \Delta x_1 + m_2 \Delta x_2 + \ldots + m_N \Delta x_N}{M_{\text{tot}}}$$

$$\Delta Y_{\text{c.m.}} = \frac{m_1 \Delta y_1 + m_2 \Delta y_2 + \ldots + m_N \Delta y_N}{M_{\text{tot}}}$$

وبقسمة طرفى كل من هاتين المعادلتين على الفترة الزمنية Δt نحصل على تعبيرين لمركبتى سرعة مركز الكتلة :

$$(\mathbf{V}_x)_{\text{c.m.}} = \frac{m_1 \mathbf{v}_{1x} + m_2 \mathbf{v}_{2x} + \ldots + m_N \mathbf{v}_{Nx}}{M_{\text{tot}}}$$

$$(\mathbf{V}_y)_{\text{c.m.}} = \frac{m_1 \mathbf{v}_{1y} + m_2 \mathbf{v}_{2y} + \ldots + m_N \mathbf{v}_{Ny}}{M_{\text{tot}}}$$

حيث يمثل البسطان مجرد المركبتين y ، x لكمية التحرك الكلية للنظام $(\mathbf{P}_{\text{tot}})_x$ و $(\mathbf{P}_{\text{tot}})_y$. وبضرب كلا الطرفين فى M_{tot} سوف نحصل على طريقة بديلة لكتابة كمية التحرك الكلية للنظام : وهذه بالتحديد هى كمية تحرك مركز كتلة النظام :

$$\mathbf{P}_{\text{tot}} = M_{\text{tot}} \mathbf{V}_{\text{c.m.}}$$

وهكذا يمكن إعادة صياغة قانون بقاء كمية التحرك الخطى على الصورة الآتية :

تظل سرعة مركز كتلة أى نظام معزول ثابتة إذا كانت محصلة القوى الخارجية المؤثرة عليه صفرًا .

مثال توضيحى 6-5 :

احسب سرعة مركز كتلة النظام المكون من الكرتين فى الشكل 6-15 قبل التصادم وبعده . أثبت أن كمية تحرك مركز الكتلة محفوظة :

استدلال منطقى : قبل التصادم لم يكن لأى من الكرتين مركبة للسرعة من الاتجاه y ، إذن :

$$(\mathbf{V}_{\text{c.m.}})_{x0} = \frac{m(5 \text{ m/s}) + (2m)(0)}{m + 2m} = 1.67 \text{ m/s}$$

$$(\mathbf{V}_{\text{c.m.}})_{y0} = 0$$

وبعد التصادم :

$$(V_{c.m.})_{xf} = \frac{m(2\text{ m/s})(\cos 50^0) + 2m(1.86\text{ m/s})}{3m}$$

$$= 1.67\text{ m/s}$$

$$(V_{c.m.})_{yf} = \frac{m(2\text{ m/s})(\sin 50^0) + 2m(-0.766\text{ m/s})}{3m}$$

$$= \frac{+1.53\text{ m/s} - 1.53\text{ m/s}}{3m} = 0$$

أى أن التصادم لم يغير سرعة مركز الكتلة .

6-8 وجهة نظر حديثة :

بقاء كمية التحرك فى التصادمات الذرية والنووية

كان بقاء كمية التحرك وطاقة الحركة فى التصادمات المرنة الوسيلة الحقيقية لتعميق فهمنا للتفاعلات الفيزيائية التى تحدث فى عالم الجسيمات فائقة الدقة ، عالم الذرة ونواتها . وقد أدت نتائج التجارب العملية فى هذا المجال إلى تعديل كثير من المفاهيم الأخرى فى الفيزياء الكلاسيكية ، ولكنها لم تمس هذين المفهومين على الإطلاق . وسوف نناقش الآن مثالين لتطبيق هذين المبدأين فى الفيزياء الحديثة ، وهما على وجه التحديد اكتشاف جسيم أولى جديد يسمى النيوترون فى عام 1932 ومشاهدة التصادمات الشبيهة بتصادم الجسيمات بين الضوء والإلكترونات فى عام 1923 .

اكتشاف النيوترون

فى عام 1930 اكتشف والتر بوثى * انبعاث اشعاع ذى قدرة اختراق عالية من ذرات البريليوم عند ضربها (قنبلتها) بالجسيمات عالية السرعة . وقد كان جيمس تشادويك ** أول من تمكن من تحديد طبيعة هذا الاشعاع بعد ذلك بعامين اثنين . والواقع أن تشادويك لم يتمكن من رصد الجسيمات المكونة لهذه بطريقة مباشرة لأنها جسيمات غير مشحونة ومن الصعب اصطيادها أو حتى كشفها . وبدلاً من ذلك سمح تشادويك لهذه الجسيمات بالتصادم مع ذرات الهيدروجين والنيتروجين لأن حركة هذه الذرات يمكن قياسها كما سنرى فى فصول لاحقة . وقد وجد أنه عند تصادم أحد هذه الجسيمات بالذرة فإن الذرة تكتسب طاقة وكمية تحرك . ونظرًا لأن مثل هذه التصادمات تامة المرونة . يمكن مساواة طاقة الحركة قبل التصادم بطاقة الحركة بعد التصادم . أما المعادلة الثانية التى تصف التصادم فيمكن الحصول عليها بمساواة كميتى

* Walter Bothe .

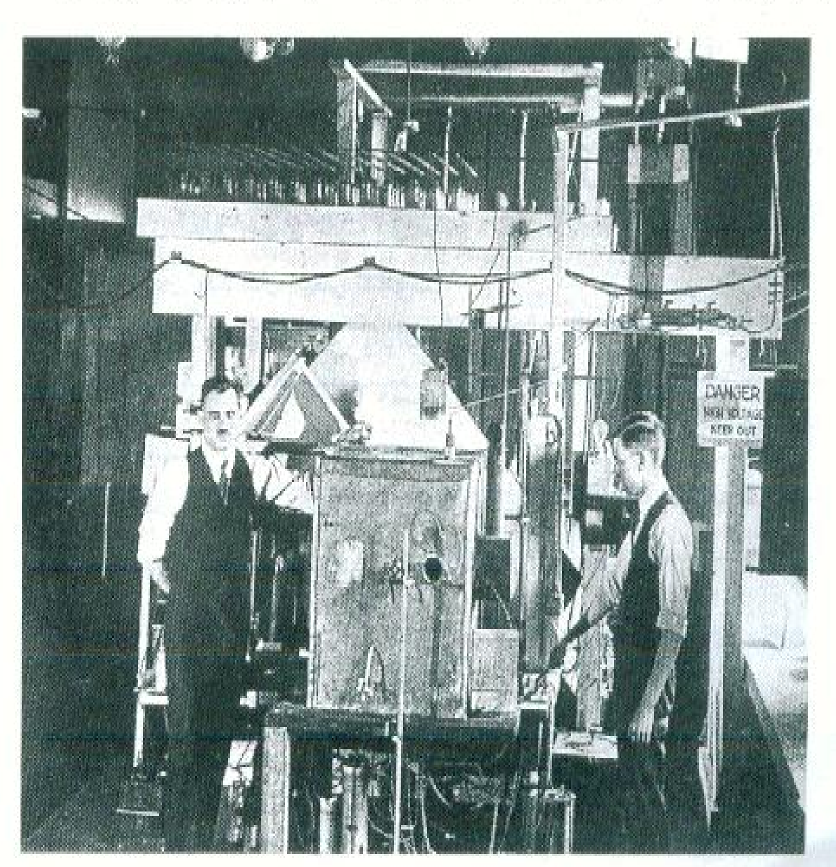
** James Chadwick

التحرك قبل التصادم وبعده . وبقياس طاقة الذرات وكمية تحركها أصبح لدى تشادويك المعلومات الكافية لحل معادلتى الطاقة وكمية التحرك بالنسبة إلى كتلة الجسيم المجهول ، أى النيوترون . وبهذه الطريقة وجد أن كتلة النيوترون 1.67×10^{-27} kg .

استطارة الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات .

أثناء القرن التاسع عشر أثبتت الدراسات العملية والنظرية أن الضوء ظاهرة موجبة كهرومغناطيسية . وقرب انتهاء ذلك القرن أدى اكتشاف الموجات اللاسلكية والأشعة السينية إلى توسيع معلوماتنا عن الضوء لتتضمن الموجات فائقة الطول والموجات فائقة القصر ، على الترتيب . وبحلول عام 1903 تأكد نظريًا وعمليًا أن الموجات الضوئية تحمل طاقة وكمية تحرك .

ومع ذلك فإن نتائج بعض التجارب التى أجريت فى بداية القرن العشرين ، والتى يحدث فيها تبادل للطاقة بين الضوء والجسيمات الذرية ، لم يمكن تفسيرها على أساس أنها تفاعلات بين موجات وجسيمات . وتتضمن بعض هذه التجارب دراسة انبعاث الإلكترونات من أسطح بعض الفلزات عند تشعيعها بالضوء ، وهو ما يعرف **بالظاهرة الكهروضوئية** . (الظاهرة الكهروضوئية هى مبدأ عمل الخلايا الشمسية ، كتلك الخلايا المستخدمة فى مقاييس التعريض الفوتوغرافية وحاسبات الجيب التى تعمل بالخلايا الشمسية) . وقد اهتمت مجموعة أخرى من التجارب بدراسة طريقة توليد الأشعة السينية بتعريضها للإلكترونات ذات الطاقة العالية . هاتان الظاهرتان لم يمكن تفسيرهما إلا بفرض أن الضوء عبارة عن سيال من الجسيمات . ولكنها يجب أن تكون جسيمات

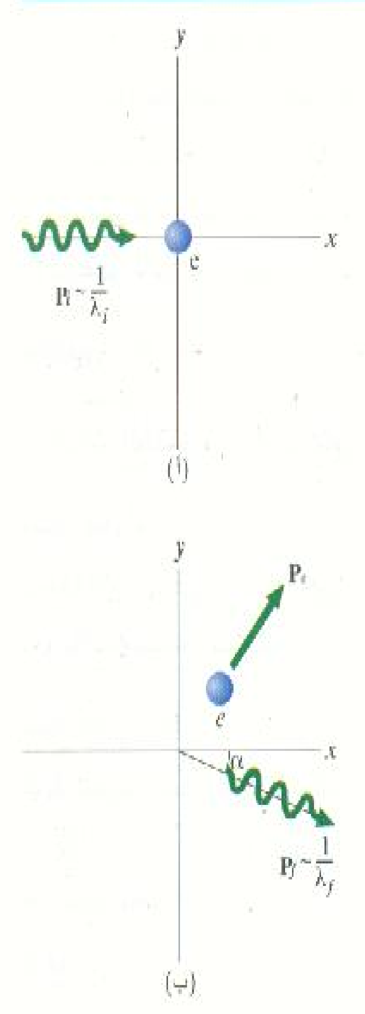


كومبتون وسليمون مع المعدات المستخدمة لإثبات السمة الجسيمية للأشعة السينية .

ذات خواص غريبة للغاية . ذلك أنها يجب أن تكون عديمة الكتلة وأن تتحرك بسرعة الضوء ، وعلاوة على ذلك فإن طاقتها وكمية تحركها لابد أن تتناسب عكسيًا مع الطول الموجى للضوء الذى تمثله . وقد كان هذا الاقتراح الأخير غريبًا بوجه خاص لأنه يعنى ضمنيًا مفهوم **جسيم** تتضمن خواصه الديناميكية خاصية **موجية** .

وفى عام 1923 أجرى الفيزيائى الأمريكى آرثر هـ. كومبتون* تجربة أثبتت أن الضوء ، فى صورة أشعة سينية ، يستطار على الإلكترونات فى تصادمات مرنة ككرات البلياردو . فعندما تضرب الأشعة السينية الإلكترونات الساكنة فإنها تنقل إلى الإلكترونات بعضًا من طاقتها وكمية تحركها ، ويمثل الشكل 17-6 أحد هذه التصادمات .

وحيث أن طاقة الأشعة السينية وكمية تحركها تتناسب عكسيًا مع الطول الموجى ، فإن هذا النقص فى الطاقة وكمية التحرك سوف يظهر كزيادة فى الطول الموجى للأشعة السينية المستطارة بالمقارنة بالطول الموجى للأشعة السينية الساقطة . وبتطبيق مبدأى بقاء الطاقة وكمية التحرك على الموقف المبين بالشكل 17-6 سيكون من السهل اشتقاق علاقة لهذا التغير فى الطول الموجى ، وقد وجد أنه يعتمد على زاوية استطارة الأشعة السينية نتيجة للتصادم** . ومن الجدير بالذكر أن نتائج كومبتون العملية تتفق تمامًا مع هذه العلاقة ، وهو ما يمثل تحقيقًا أكيدًا لصحة قانونى البقاء ، كما أنه يعطى علاوة على ذلك البرهان الفعلى على أن الأشعة السينية لها خواص جسيمية تظهر واضحة فى هذه التصادمات . وقد منح كومبتون فيما بعد جائزة نوبل فى الفيزياء عن هذا العمل .



شكل 17-6 :
ظاهرة كومبتون . استطارة أحد الأشعة السينية بواسطة إلكترون وإنتاج شعاع مستطار ذى طول موجى أطول .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) كمية التحرك الخطى ، (ب) الدفع ، (جـ) النظام المعزول ، (د) التصادم المرن مقابل غير المرن ، (هـ) الارتداد ، (و) البندول القذفى . (ز) الضغط ، (ح) مركز كتلة نظام من الكتل .

2 ـ كتابة نص قانون نيوتن الثانى بدلالة كمية التحرك .

3 ـ إيجاد التغير فى كمية تحرك جسم بسبب دفع معلوم ، والعكس .

4 ـ كتابة قانون بقاء كمية التحرك الخطى واستخدامه فى المواقف البسيطة .

5 ـ تحليل تصادم جسمين يلتصقان معًا عند التصادم .

6 ـ تحليل المواقف التى ينفجر فيها جسم ساكن إلى أجزاء عديدة .

7 ـ تحليل المواقف التى يتحرك فيها جسمان على استقامة خط مستقيم ثم يتصادمان تصادمًا تام المرونة ويستمران بعدئذ فى الحركة على استقامة نفس الخط المستقيم .

---

* Arthur H. Compton .

** فى تجربة الاستطارة قام كومبتون بقياس الطول الموجى λ_f للأشعة السينية المستطارة واتجاهها α بالنسبة لاتجاه الأشعة الساقطة كما هو مبين بالشكل 17-6 . وبتطبيق قانونى بقاء الطاقة وكمية التحرك أمكن التنبؤ بأن التغير فى الطول الموجى $\lambda_f - \lambda_i$ يجب أن يتناسب مع $(1 - \cos\alpha)$.

8 ـ ذكر الأسباب المعقولة لعدم ثبات طاقة الحركة فى غالبية التصادمات .

9 ـ شرح مبدأ عمل الصواريخ والمحركات النفاثة وغيرها من الأجهزة المشاهدة التى تعمل على أساس الارتداد .

10 ـ حساب موضع مركز كتلة نظام من الكتل وسرعة مركز الكتلة .

11 ـ تطبيق قانون بقاء كمية التحرك على كمية تحرك مركز كتلة نظام .

12 ـ تطبيق قانون بقاء كمية التحرك فى المسائل ذات البعدين والأبعاد الثلاثة .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

كمية التحرك :

الوحدة الأساسية فى النظام SI هى $1\ \mathrm{kg\ .\ m/s}$.

تعريفات ومبادئ أساسية :

كمية التحرك الخطى:

كمية التحرك الخطى $\mathbf{p}$ لجسم متحرك كتلته m وسرعته $\mathbf{v}$ هى :

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \tag{6-1}$$

هذه كمية متجهة فى اتجاه السرعة .

الدفع :

إذا أثر صافى قوة متوسطة $\overline{\mathbf{F}}$ على جسم لزمن قدره t فإن دفع القوة يعرف بالعلاقة :

$$\text{الدفع} = \overline{\mathbf{F}}\,t$$

هذه نتيجة مباشرة لقانون الحركة الثانى لنيوتن .

مبدأ بقاء كمية التحرك الخطى :

كمية التحرك الخطى الكلية لنظام معزول تساوى مقدارًا ثابتًا . هذه نتيجة مباشرة للقانون الثالث للحركة . وينص هذا المبدأ على أن القوة الداخلية لا يمكن أن تغير كمية التحرك الكلى لنظام **بصرف النظر عما يحدث فيه داخليًا** .

خلاصة :

1 ـ النظام المعزول هو مجموعة من الكتل لا يقع تحت تأثير أى قوى خارجية . وهذا يعنى عمليًا أن تأثير أى قوى خارجية على النظام مهمل بالمقارنة بتأثير القوى الداخلية .

2 ـ كمية التحرك الكلية لنظام هى **المجموع الاتجاهى** لكميات تحرك مختلف الكتل المكونة للنظام .

3 ـ يمكن أن تتغير كميات تحرك الكتل المكونة للنظام المعزول ، ولكن بشرط أن **تلاشى هذه التغيرات بعضها بعضًا** .

4 ـ يمكن تحليل كمية تحرك نظام إلى مركباته المتعامدة ، ويمكن تطبيق مبدأ بقاء كمية التحرك على كل مركبة على حدة .

أنواع التصادمات :

تصادمات غير مرنة :

التصادم غير المرن هو تصادم يحدث فيه بعض الفقد فى طاقة حركة النظام .

تصادمات مرنة :

التصادم تام المرونة هو تصادم تكون فيه طاقة الحركة محفوظة .

خلاصة :

1 ـ يتحول معظم طاقة الحركة المفقودة فى تصادم غير مرن عادة إلى طاقة حرارية للنظام .

2 ـ يجب أن تكون كمية التحرك محفوظة دائمًا فى كل التصادمات داخل الأنظمة المعزولة .

3 ـ إذا كان للنظام كمية تحرك ابتدائية ما فإن طاقة حركته لا يمكن أن تفقد كلها بل يجب أن يبقى منها قدر كاف لكى تظل كمية التحرك الأصلية محفوظة .

مركز الكتلة :

يعرف مركز كتلة نظام من الكتل عددها N بالعادلتين :

$$X_{c.m.}=\frac{m_1x_1+m_2x_2+.....+m_N\ x_N}{m_1+m_2+.....+m_N} \qquad (6\text{-}6)$$

و :

$$Y_{c.m.}=\frac{m_1y_1+m_2y_2+.....+m_N\ y_N}{m_1+m_2+.....+m_N} \qquad (6\text{-}7)$$

حيث x_n و y_n إحداثيا الكتلة رقم n .

كمية تحرك مركز الكتلة :

كمية تحرك مركز كتلة نظام ما تساوى كمية التحرك الكلية للنظام .

$$\mathbf{P}_{tot}=M_{tot}\,\mathbf{V}_{c.m.}=\mathbf{P}_{tot}$$

وعليه فإن سرعة مركز كتلة نظام معزول تظل ثابتة .

أسئلة وتخمينات

1 ـ يرتد المدفع الكبير مسافة معينة إلى الخلف ضد جهاز تلطيف للحركة عند إطلاقه . لماذا يكون من الضرورة صنع حامل المدفع بحيث « يخضع » بهذه الطريقة ؟

2 ـ أطلقت قطعة من العلك (اللبان) على قالب خشبى . فى أى حالة تؤثر قطعة العلك بدفع أكبر على القالب ، عندما تلتصق به أم عندما ترتد عنه ؟

3 ـ عند فتح بالون مملوء بالهواء بحيث يهرب الهواء منه فإن البالون ينطلق فى الهواء . اشرح ذلك . هل يحدث نفس الشىء إذا كان البالون فى الفراغ .

4 ـ اشرح لماذا يتسارع الصاروخ حتى فى الفضاء الخارجى حيث لا يوجد هواء يستطيع الصاروخ دفعه .

5 ـ بنى مخترع قاربًا شراعيًا وركب عليه مروحة كهربائية كبيرة . وجه المخترع المروحة تجاه الشراع بحيث يستقبل هوائها متوقعًا أن يتحرك القارب فى اتجاه هذه الرياح الصناعية ، ولكنه تعجب عندما رأى أن القارب يتحرك ببطء فى الاتجاه العكسى . هل يمكنك أن تفسر لماذا حدث ذلك ؟

6 ـ عندما تسقط كرة على أرضية صلدة تكون كمية تحركها رأسية إلى أسفل ، وعندما ترتد تصبح كمية تحركها رأسية إلى أعلى .

في هذا التصادم لا تكون كمية تحرك الكرة محفوظة حتى بالرغم من أن الكرة قد ترتد إلى نفس الارتفاع الذى أسقطت منه . هل يتناقض هذا مع قانون بقاء كمية لتحرك ؟

7 ـ اشرح مستعينا بمعادلة الدفع لماذا لا يكون من الحكمة أن تحتفظ بساقيك مستقيمين صلبين عندما تقفز من فوق حائط أو منضدة إلى الأرض . ما علاقة هذا بالاعتقاد السائد بأن احتمال إصابة الشخص المخمور عند السقوط أقل من الشخص غير المخمور ؟

8 ـ اشرح بالاستعانة بمعادلة الدفع مبدأ عمل مصادمات السيارات الماصة للصدمات وأجهزة امتصاص الصدمات المشابهة .

9 ـ أصيب لاعب بيسبول بالكابوس التالى . وجد اللاعب نفسه محبوسًا مصادفة فى شاحنة سكة حديد صندوقية ، ولحسن الحظ كان معه كرته ومضربه . ولكى يبدأ اللاعب فى تحريك العربة فإنه يقف فى إحدى نهايتيها ويضرب الكرة فى اتجاه النهاية الأخرى . ونتيجة لذلك يسبب الدفع الذى تؤثر به الكرة عند اصطدامها بنهاية العربة حركتها إلى الأمام . وحيث أن الكرة ترتد دائمًا وتتدحرج على الأرضية نحو اللاعب فإنه يكرر هذه العملية مرات ومرات ، وفى نهاية الأمر تكسب الشاحنة سرعة عالية ، ويقتل اللاعب عند اصطدام الشاحنة الصندوقية بأخرى ساكنة على نفس خط السكة الحديد . حلل هذا الحلم من الناحية الفيزيائية .

10 ـ اشرح كيف تقفز الفولة المكسيكية القفازة بدون تدخل خارجى .

11 ـ ثبت قالبان غير متساويى الكتلة فى طرفى زنبرك ووضع النظام كله على منضدة لا احتكاكية . دفع القالبان تجاه أحدهما الآخر وربطا بخيط بحيث يكون الزنبرك منضغطاً . صف حركة القالبين عندما يقطع الخيط .

12 ـ قفزت سيدة كتلتها 70 kg من فوق سطح منزل ارتفاعه 10 m عن الأرض . (أ) ما مقدار سرعتها بالتقريب قبل أن ترتطم بالأرض مباشرة ؟ (ب) إذا وصلت هذه السيدة إلى الأرض على قدميها وسمحت لرجليها « بالخضوع » ، فما هو الزمن اللازم حتى تصل إلى السكون ؟ (جـ) ما هى القيمة التقريبية لمتوسط القوة التى تؤثر بها الأرض على السيدة ؟

13 ـ لنفرض أنك وضعت يدك منبسطة على سطح منضدة ثم اسقطت عليها كتلة معملية مسطحة قدرها 1.0 kg من ارتفاع قدره 0.50 m . قدر متوسط القوة التى تؤثر بها الكتلة على يدك . لماذا يكون احتمال الإصابة كبيرًا فى هذه الحالة بالرغم من أنك تستطيع التقاط الكتلة بسهولة عند إسقاطها من نفس الارتفاع ؟

مسائل

القسم 6-1

1 ـ ما قيمة كمية التحرك الخطى (أ) لسيارة كتلتها 1350 kg متحركة بسرعة قدرها 95 km/h تجاه الشمال ؟ (ب) رصاصة كتلتها 12.5 g متحركة إلى أعلى بمعدل 2450 ft/s ؟ (جـ) عابرة محيطات كتلتها 7.3×10^7 kg متحركة تجاه الغرب بمعدل 20 mi/h ؟ عبر عن إجاباتك بالوحدات SI .

2 ـ ما قيمة كمية التحرك الخطى لحجر كتلته 7.50 kg بعد سقوطه من السكون مسافة قدرها 15.5 m ؟

3 ـ اشتق التعبير العام لكمية تحرك جسم كتلته m يسقط من السكون مسافة قدرها h .

4 ـ ما مقدار كمية التحرك الخطى لسيارة كتلتها 1600 kg وطاقة حركتها 8.50×10^6 J ؟ ما مقدار سرعة السيارة ؟

5 ـ اشتق التعبير العام الذى يربط طاقة حركة كتلته قدرها m بكمية تحركها الخطى .

القسم 6-2 (استخدم طريقتي كمية التحرك والدفع)

6 ـ ما مقدار القوة اللازمة لإيقاف دراجة براكبها خلال 1 s إذا كانت كتلتهما الكلية 115 kg والسرعة الابتدائية للدراجة 17.1 m/s ؟

7 ـ عين متوسط القوة اللازمة لتغيير سرعة حافلة (أتوبيس) كتلته 22,000 kg من السكون إلى 13.6 m/s خلال 10.5 s .

■ 8 ـ تحتاج طائرة نفاثة ذات ثلاثة محركات ووزنها 440,000 lb عند الإقلاع إلى مسافة قدرها 1750 m لتصل إلى سرعة الإقلاع وقدرها 240 km/h . ما متوسط القوة التي يجب أن يولدها كل محرك أثناء الإقلاع ؟ افترض أن الاحتكاك يمكن إهماله .

9 ـ رصاصة كتلتها 12.5 g تتحرك بسرعة مقدارها 235 m/s . اخترقت هذه الرصاصة لوحًا من البلاستيك سمكه 3.4 cm فنفذت منه وخرجت بسرعة مقدارها 125 m/s . فإذا كان زمن مرور الرصاصة خلال اللوح 1.9×10^{-4} s ؛ أوجد متوسط قوة الإيقاف المؤثرة على الرصاصة .

■■ 10 ـ ارتطمت كرة كتلتها 345 g وسرعتها 15.5 m/s عموديًا بحائط وارتدت في الاتجاه المعاكس بسرعة مقدارها 10.7 m/s . وفي اللحظة الابتدائية للتصادم تحرك مركز الكرة 0.225 cm مقتربًا من الحائط قبل الارتداد . احسب زمن تلامس الكرة مع الحائط بفرض أن التقاصر منتظم . ما متوسط قوة تأثير الحائط على الكرة خلال هذا الزمن ؟

■ 11 ـ أطلق بروتون كتلته $m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg وسرعته 5.8×10^{7} m/s على لوح من البلاستيك الرغوى سمكه 0.33 cm فاخترقه وخرج من الجانب الآخر بسرعة مقدارها 1.5×10^{7} m/s . ما مقدار زمن مرور البروتون في البلاستيك بفرض أن العجلة التقصيرية ثابتة ؟ وما متوسط القوة المعوقة لحركة البروتون ؟

■ 12 ـ أطلق سهم كتلته 62 g بسرعة قدرها 32.2 m/s على بطيخة فحفر فيها حفرة نافذ مستقيمة طولها 75 cm . فإذا استغرق السهم 0.0375 s للخروج من الجانب الآخر ، فما متوسط القوة المعوقة لحركة السهم ؟

■ 13 ـ يندفع سيال أفقي من الماء من فتحة خرطوم ويصطدم بنافذة رأسية ويفقد سرعته عند التصادم . فإذا كان $26\ cm^3$ (أى 26 g) من الماء المتحرك بسرعة قدرها 2.10 m/s يضرب النافذة كل ثانية ، أوجد (أ) الدفع المؤثر على النافذة في زمن t ، (ب) متوسط القوة المؤثرة على النافذة .

■ 14 ـ تسقط قطع الفحم رأسيًا من قاع مجرى مائل بمعدل 7.6 kg/s على سير نقل يتحرك أفقيًا بسرعة قدرها 2.0 m/s . ما مقدار القوة اللازمة لتشغيل سير النقل ؟ افترض أن الاحتكاك في آلية التشغيل مهمل .

القسمان 3-6 و 4-6

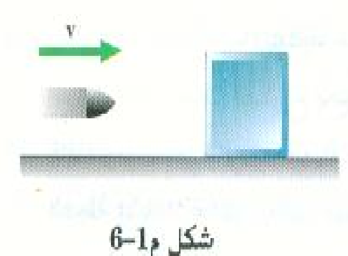
15 ـ في إحدى عمليات التحويل بالسكة الحديد انسابت عربة قطار كتلتها M_1 على خط حديدى مستقيم بسرعة **v** فاصطدمت والتحمت بعربة أخرى ساكنة كتلتها M_2 . أوجد سرعة العربتين بعد الالتحام .

16 ـ في أحد تعارين الرماية أطلقت امرأة رصاصة كتلتها 5.25 g بسرعة أفقية قدرها 185 m/s على كتلة خشبية كتلتها 5.5 kg موضوعة على قمة شاخص فاستقرت فيها . بأى سرعة سوف تطير الكتلة الخشبية من فوق الشاخص ؟

17 ـ تصادمت كرتان متماثلتان عندما كانت الكرة 1 متحركة إلى اليمين بسرعة قدرها 36 m/s والأخرى 2 متحركة إلى اليسار بسرعة قدرها 12 m/s . أوجد مقدار واتجاه سرعتهما إذا التصقتا معًا .

18 ـ (أ) كرر المسألة 17 إذا كانت كتلة الكرة 2 ضعف كتلة الكرة 1 . (ب) إذا سكنت الكرتان بعد التصادم فما مقدار كتلة الكرة 2 بدلالة كتلة الكرة 1 ؟

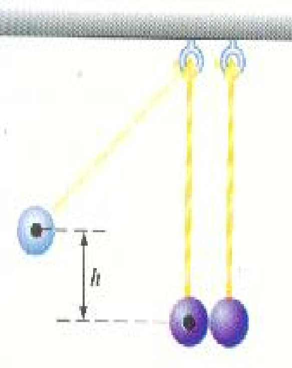
■ 19 ـ أطلقت رصاصة كتلتها 17.5 g بسرعة قدرها 5560 m/s على قالب ساكن فوق منضدة كتلته 8.45 kg فارتدت في الاتجاه المعاكس بسرعة مقدارها 1260 m/s (انظر الشكل م1-6) . أوجد مقدار سرعة القالب بعد التصادم مباشرة ؛ (ب) قوة الاحتكاك بين القالب والمنضدة إذا تحرك القالب مسافة قدرها 132 cm قبل توقفه مباشرة .



شكل م1-6

■ 20 ـ وضع قالب كتلته 2.6 kg فوق ثقب صغير فى منضدة ، وأطلقت سيدة رصاصة كتلتها 12.7 kg من أسفل المنضدة خلال الثقب فاستقرت فى القالب . بأى سرعة كانت تتحرك الرصاصة قبل التصادم إذا ارتفع القالب مسافة قدرها 55 cm عن سطح المنضدة ؟

■ 21 ـ سقطت كرة سقوطًا حرًا ، وعندما وصل مقدار سرعتها إلى 9.2 m/s انفجرت الكرة إلى قطعتين تحركت إحداهما رأسيًا إلى أعلى ووصلت إلى ارتفاع قدره 13.7 m فوق نقطة الانفجار . ما سرعة القطعة الأخرى بعد الانفجار مباشرة ؟ كرر حل المسألة عندما تكون كتلة الجزء المتحرك إلى أعلى ضعف كتلة الجزء الآخر .



شكل م2–6

■ 22 ـ الكرتان الموضحتان فى الشكل المبين م2–6 متساويتين فى الكتلة . أزيحت الكرة اليسرى إلى الموضع المبين بالشكل ثم أعتقت فاصطدمت بالكرة الأخرى والتصقت بها . (أ) بأى سرعة سوف تتحرك الكرتان بعد التصادم مباشرة ؟ (ب) ما هى القيمة النسبية لطاقة الحركة التى تفقدها الكرة الأولى فى التصادم ؟

■ 23 ـ افترض أن الكرتين فى الشكل م2–6 مختلفتان فى الكتلة ، وأن كتلة الكرة اليسرى m_1 . عندما تركت الكرة اليسرى حرة لتبدأ حركتها من الوضع المبين تصادمت مع الكرة الثانية والتصقت بها . وبعد التصادم بدأت المجموعة فى التأرجح ووصلت إلى ارتفاع قدره h/6 . أوجد كتلة الكرة الثانية m_2 بدلالة m_1 .

24 ـ أزيحت الكتلتان المتساويتان فى الشكل م2–6 إلى ارتفاع قدره h إحداهما إلى اليسار والأخرى إلى اليمين . أعتقت الكرتان فى نفس اللحظة فتصادمتا معًا تصادمًا تام المرونة عند قاع المسار . إلى أى ارتفاع تصل كل كرة بعد التصادم ؟

■■ 25 ـ أزيحت الكرة اليسرى فى الشكل م2–6 جانبا ثم أعتقت ، وكانت سرعتها عند القاع $\mathbf{v}_0$ قبل تصادمها مع الكرة اليمنى تصادما تام المرونة . أوجد سرعتى الكرتين بعد التصادم مباشرة إذا كانت كتلة الكرة اليسرى 3.5 ضعفا قدر كتلة الكرة اليمنى .

■ 26 ـ تصادم نيوترون ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) متحركة بسرعة قيمتها $\mathbf{v}_0$ تصادمًا تام المرونة مع جسيم ساكن مجهول الكتلة فارتد إلى الخلف مباشرة بسرعة قدرها $0.7\ \mathbf{v}_0$. ما كتلة الجسيم المضروب ؟

■ 27 ـ ضرب نيوترون (كتلته m_0) متحرك بسرعة $\mathbf{v}_0$ نواة ذرة حديد ساكنة (كتلتها $56\ m_0$) فارتد فى الاتجاه العاكس فى تصادم تام المرونة . أوجد سرعة نواة الحديد بفرض أن حركتها حرة .

■ 28 ـ ما هى النسبة المفقودة من طاقة الحركة الأصلية للنيوترون والتى تكتسبها نواة الحديد فى المسألة 27 ؟

■■ 29 ـ تصادم جسم كتلته m_1 متحرك بسرعة مقدارها $\mathbf{v}_0$ تصادمتا مباشرًا مع جسم ساكن آخر كتلته m_2 . أثبت أن أكبر نسبة من طاقة الحركة الأصلية للجسم ذى الكتلة m_1 سوف تنتقل إلى الجسم الآخر ذى الكتلة m_2 عندما تكون $m_1 = m_2$.
(**تلميح** : افترض أن $m_2 = k\ m_1$ ، حيث k أى عدد ، ثم اشتق تعبيرًا لمقدار طاقة الحركة التى يكتسبها الجسم ذو الكتلة m_2 بدلالة k ، وأثبت أن القيمة العظمى لهذا المقدار تتحقق عندما يكون $k = 1$) .

القسم 5-6

30 ـ يعتبر الصاروخ German V-2 الذى أنتج قرب نهاية العالمية الثانية أول صاروخ حقيقى يستخدم كسلاح حربى بعيد المدى . كان محرك الصاروخ يحرق الوقود بمعدل قدره 600 kg/s تقريبًا عندما تكون سرعة العادم 2000 m/s ، كما كانت كتلته وهو ممتلئ بالوقود عند الإطلاق 9×10^4 kg . (أ) ما مقدار الدفع الذى يولده الصاروخ V-2 ؟ (ب) ما قيمة العجلة الابتدائية التى ينطلق بها الصاروخ V-2 من منصة الإطلاق ؟ عبر عن هذه العجلة كمضاعفات لعجلة الجاذبية g .

■ 31 ـ وجدت نفسك على طبقة من الثلج اللااحتكاكى وأنت تحمل كرة بولينج كتلتها 7.2 kg ، وكانت أقرب أرض عارية من

الجليد تبعد عنك مسافة أفقية قدرها 21.5 m . ولكى تخرج من الجليد كان عليك أن تقذف الكرة فى الاتجاه المعاكس تمامًا لموضع أقرب نقطة على الأرض العارية بسرعة مقدارها 3.3 m/s . إذا كانت كتلتك 72 kg ، فبعد أى زمن من لحظة قذف الكرة تصل إلى الأرض العارية ؟

32 ـ بينما كانت طفلة كتلتها 13.9 kg جالسة فى عربتها المتحركة تلقائيًا فى طريق بسرعة مقدارها 0.65 m/s رأت أمامها كلبًا متوحشًا فأصابها ذعر شديد . ونظرًا لأنها كانت تحمل معها كيسًا من السكر كتلته 2.27 kg كانت قد اشترته لمنزلها من محل البقالة ، فقد قامت بقذف الكيس على الكلب بسرعة أمامية قدرها 4.76 m/s بالنسبة إلى حركتها الأصلية . فإذا كانت كتلة العربة 6.4 kg ، فما سرعة الطفلة والعربة بعد قذف السكر ؟

▪ 33 ـ مسدس كتلته 1.25 kg يستقر ساكنًا على سطح نضد لا احتكاكى تقريبًا وبطريق الصدفة انطلقت من المسدس رصاصة كتلتها 15 kg فى اتجاه مواز لسطح المنضدة . ما المسافة التى تقطعها الرصاصة خلال الزمن الذى يرتد فيه المسدس مسافة قدرها 350 mm ؟

34 ـ بندقية آلية تطلق 100 طلقة كتلة كل منها 13.5 g فى الدقيقة بسرعة مقدارها 650 m/s . ما متوسط قوة الارتداد المؤثرة على البندقية خلال دفعة زمنها 1 min ؟

▪ 35 ـ تتحرك سفينة فضاء كتلتها 18,000 kg تجاه القمر بسرعة مقدارها 750 m/s ، ولكن مراقبى الرحلة على الأرض وجدوا أن من الضرورى انقاص سرعتها إلى 550 m/s . وكان المحرك الصاروخى فى مؤخرة السفينة يستطيع حرق الوقود والمادة المؤكسدة بمعدل 85 kg/s ويصرف العادم الغازى بسرعة مقدارها 2300 m/s . فى أى اتجاه يجب وضع السفينة ولأى زمن يجب أن يحرق المحرك الصاروخى الوقود لإجراء التصحيح المطلوب فى السرعة ؟

القسم 6–6

▪ 36 ـ انفجرت قنبلة ساكنة كتلتها m_0 فجأة فتفتت إلى ثلاث قطع متماثلة كتلة كل منها $m_0/3$. ونتيجة لذلك طارت قطعة فى الاتجاه الموجب للمحور x بسرعة قدرها 42 m/s وطارت الأخرى فى الاتجاه السالب للمحور y بسرعة مقدارها 25 m/s . أوجد سرعة القطعة الثالثة . كرر حل المسألة إذا كانت كتلة القطعة الثالثة $m_0/2$ وكتلة كل من القطعتين الأخريين $m_0/4$.

▪ 37 ـ تتحرك السيارة A (وكتلتها M_A) تجاه الشمال بسرعة v_0 وتتحرك السيارة B (كتلتها $2M_A/3$) تجاه الغرب بنفس مقدار السرعة . تصادمت السيارتان عند التقاطع والتصقت كل منهما بالأخرى . ما هى سرعتهما المشتركة بعد التصادم مباشرة ؟

▪ 38 ـ يتحرك بروتونان على استقامة المحور x ، أحدهما بسرعة v_0 والآخر بسرعة قدرها $-v_0$. تصادم هذان الجسيمان تصادمًا مباشرًا ، ونتيجة لذلك انطلق أحدهما بعد التصادم فى اتجاه يصنع زاوية قدرها 50° مع الاتجاه الموجب للمحور x . ماذا حدث للآخر ؟ وما سرعة البروتونين بعد التصادم ؟

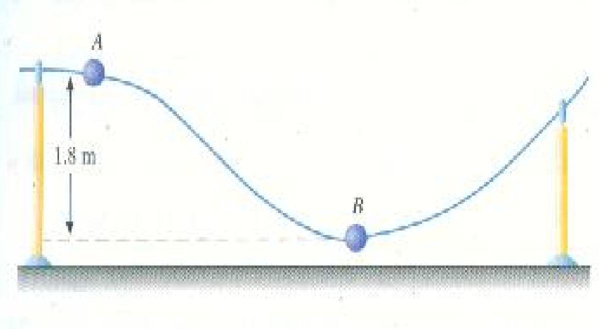
▪ 39 ـ تصادم جسيمان متساويان فى الكتلة عندما كانت مركبتا سرعة أحدهما فى الاتجاهين y و x $(0 , -v_0)$ ومركبتا سرعة الآخر $(v_0/2 , v_0/2)$. وبعد التصادم أصبحت مركبتا سرعة أحد الجسمين $(0 , v_0)$. أوجد مركبتى سرعة الآخر . هل التصادم تام المرونة ؟

▪ 40 ـ انزلق قرص مطاطى من الأقراص المستخدمة فى لعبة هوكى الجليد فى الاتجاه الموجب للمحور x بسرعة مقدارها v_0 وتصادم مع قرص مماثل ساكن . وبعد التصادم تحرك القرصان أحدهما بزاوية قدرها 30° والآخر بزاوية قدرها 60° بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x . ما مقدارى سرعتى القرصين ؟

■ 41 ـ كرة كتلتها m تتحرك بسرعة مقدارها v إلى اليسار على طول المحور x تجاه كرة أخرى ساكنة كتلتها $m/5$ تقع فى نقطة الأصل . وبعد التصادم بدأت الكرة الأولى فى الحركة إلى اليسار بسرعة مقدارها $v/2$ وفى اتجاه يصنع زاوية قدرها $40°$ فوق الجزء السالب من المحور x . أوجد مقدار واتجاه سرعة الكرة الأخرى .

■■ 42 ـ كرر المسألة 41 إذا انعكست الكرة الأولى خلفًا بسرعة مقدارها $v/4$ فى اتجاه يصنع زاوية قدرها $40°$ بالنسبة للاتجاه الموجب للمحور x .

■ 43 ـ تتحرك سيارة كتلتها 1500 kg تجاه الشمال بسرعة مقدارها 22 m/s ، وتتحرك سيارة أخرى كتلتها 1800 kg تجاه الشرق بمعدل قدره 32 m/s . وصلت هاتان السيارتان إلى تقاطع الطرق فى نفس اللحظة فتصادمتا والتصقت إحدهما بالأخرى بعد التصادم . أوجد السرعة المشتركة للسيارتين بعد التصادم مباشرة .



شكل م3-6

مسائل عامة

■ 44 ـ ما مقدار الشغل اللازم بذله لمضاعفة كمية تحرك سيارة كتلتها 1250 kg عندما تكون متحركة بمعدل 15.2 m/s ؟

■■ 45 ـ انفصلت رائدة فضاء كتلتها 65 kg عن سفينتها الفضائية فوجدت نفسها سابحة فى الفضاء . وفى لحظة معينة كان البعد بينها وبين السفينة 30.5 m إلا أنها كانت تتحرك مبتعدة عن السفينة بسرعة مقدارها 5.5 cm/s بالنسبة إلى السفينة . وفى محاولة للعودة إلى سفينتها قامت رائدة لفضاء بقذف مفتاح ربط كتلته 850 g فى الاتجاه البعيد عن السفينة . هل تنجح هذه المحاولة ؟ وإذا نجحت ، فما هو الزمن اللازم لوصولها إلى سفينة الفضاء ؟

■ 46 ـ ذكر فى أحد تقارير الشرطة أن سيارة كانت واقفة فى حالة السكون ومكابحها (فراملها) مضغوطة عندما صدمتها من الخلف شاحنة وزنها 1.5 مرة قدر وزن السيارة . ونظرا لأن مكابح العجلات الأربع لكلتا المركبتين كانت مضغوطة لحظة التصادم فقد بينت علامات التزحلق على الطريق أنهما قد تزحلقتا معًا مسافة قدرها 7.8 m فى اتجاه حركة الشاحنة قبل التصادم . بفرض أن معامل الاحتكاك 0.8 ، ما مقدار سرعة الشاحنة بالتقريب قبل التصادم مباشرة .

■ 47 ـ حررت الكرة A بالشكل م3-6 عند النقطة A فانزلقت على طول السلك اللااحتكاكى وتصادمت مع الكرة B . إذا كان التصادم تام المرونة ، أوجد إلى أى ارتفاع تصل الكرة B بعد التصادم . افترض أن كتلة الكرة B تساوى 1/3 كتلة الكرة A .

■■ 48 ـ يمثل الشكل م4-6 آلة أتوود وقد زيد عليها كتلة ثالثة مماثلة للكتلة الصغرى ومتصلة بها عن طريق خيط مرتخ متعرج . بعد تحرير الكتلة 2 m سقطت هذه الكتلة مسافة قدرها D قبل أن يصبح الخيط المتعرج مشدودًا . وبعد ذلك بدأت الكتلتان على الجانب الأيسر من البكرة فى الارتفاع بنفس السرعة . ما مقدار هذه السرعة ؟ افترض أن البكرة عديمة الكتلة ولا احتكاكية .

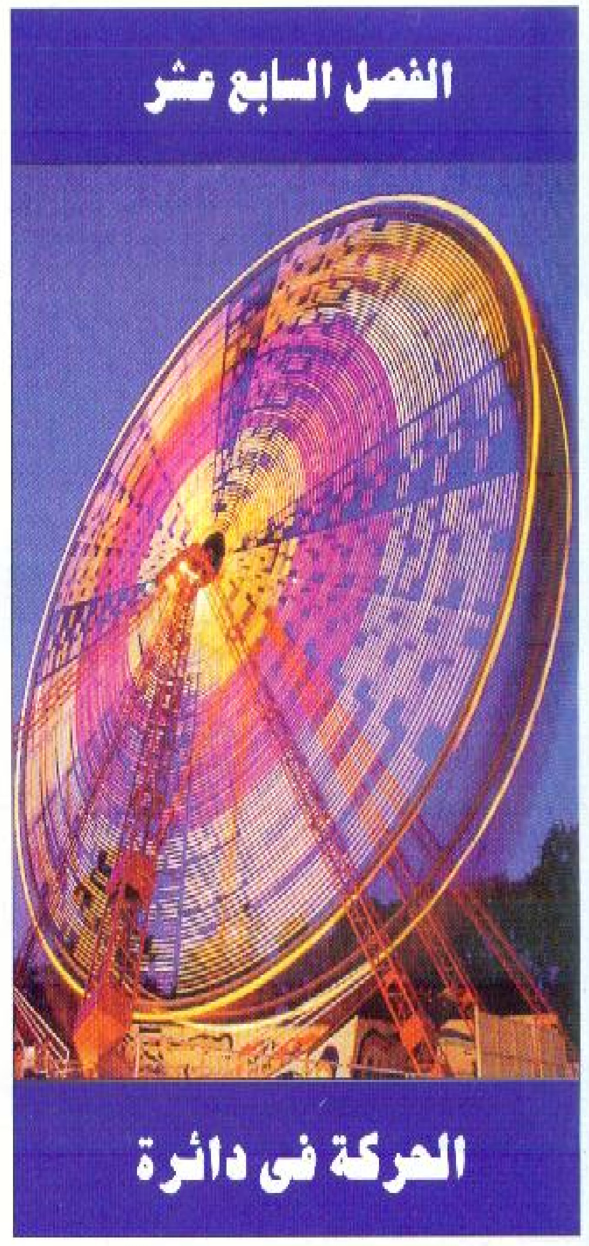
■ 49 ـ افترض أن الكتلة 2m فى الشكل م4-6 كانت مستقرة على حامل يمنعها من السقوط . وعندما أزيل حامل الكتلة الصغرى على اليسار سقطت هذه الكتلة سقوطًا حرًا مسافة قدرها L قبل أن يصبح الخيط المتعرج الذى يربطها بالكتلة الأخرى مشدودًا ، وبعد ذلك بدأت الكتل الثلاث فى الحركة معًا . أوجد مقدار السرعة المشتركة للكتل الثلاث .



شكل م4-6

50 ـ أنزلت سلسلة رأسية كتلتها الكلية M وطولـها L على منضدة بسرعة ثابتة مقدارها v ، وكان الطـرف السـفلى للسلسـلة متماسًا بالكاد مع سطح المنضدة عند اللحظة $t = 0$. اشتق تعبيرًا للقوة التى تؤثر بها السلسلة على المنضدة كدالة فى الزمـن ، مثل العلاقة بين F و t ابتداء من لحظة بداية إنزال السلسلة إلى أن تستقر كلـها كاملة على المنضدة .

51 ـ قذفت كرة تنس كتلتها 50 g على الحائط الأمامى للعب تنس فاصطدمت به فى نقطة ترتفع بمقدار 0.5 m عـن الأرضيـة . وقبل التصادم مباشرة كانت الكرة متحركة فى الاتجاه الأفقى بسرعة مقدارها 50 m/s ، وبعـد التصـادم مبـاشرة ارتـدت الكـرة بسرعة ابتدائية معينة فى الاتجاه الأفقى فوصلت إلى الأرضية فى نقطة تبعد مسافة قدرها 12.4 m عن الحـائط الأمـامى . (أ) ما مقدار سرعة ارتداد الكرة عن الحائط ؟ (ب) إذا كان زمن التصادم مع الحائط 0.025 s ، فما متوسط القـوة التـى تؤثر بها الكرة على الحائط ؟



يعتبر دوران السفينة الفضائية حول الأرض ودوران الأرض حول الشمس من الأمثلة المألوفة للحركة في مسار شبه دائرى . كذلك فإن الأجسام التى تدور حول نفسها فى حركة مغزلية والعجلات الدائرة معروفة لنا أيضًا . وسوف نتعلم فى هذا الفصل كيف يوصف هذا النوع من الحركة .

7-1 الإزاحة الزاوية θ

لوصف حركة جسم فى خط مستقيم يلزم اختيار محور على طول هذا الخط المستقيم ، وعادة يستخدم المحور x لهذا الغرض . ولوصف حركة جسم فى مسار دائرى أو دوران عجلة حول محور الدوران (الدنجل) يكون من الضرورى اختيار إحداثى لقياس الزاوية ، أى المقابل الدورانى للإزاحة الخطية . أغلب الظن أنك تعلم الطرق العادية لعمل ذلك ، ولكننا نرى أن نذكرك بها فى مراجعة سريعة .

لنفرض أن لدينا عجلة يمكن أن تدور حول محور يمر بمركزها كما هو مبين بالشكل 7-1 لكى تنتقل العجلة من الوضع a إلى b يجب إدارتها زاوية قدرها θ . هناك ثلاث طرق لقياس الزاوية . أولاً يمكن قياس θ **بالدرجات** (deg) ، وكلنا يعلم أن الدائرة الكاملة الواحدة تكافئ 360° . كذلك يمكن قياس الزاوية بالدورات (rev) ، فالدائرة

الكاملة الواحدة تكافئ دورة واحدة ، وبذلك نرى أن :

$$1\ \text{rev} = 360°$$

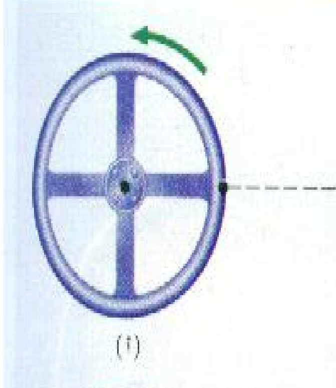
الطريقة الثالثة هي أن تقاس الزاوية **بالقياس النصف قطري** ، أو الزاوية النصف قطرية ، وقد نوقشت هذه النقطة سابقًا في الفصل الأول . ويمكن تلخيص تعريف القياس النصف قطري للزاوية بالاستعانة بالشكل 2-7 كما يأتي . عندما تدور العجلة زاوية θ تتحرك أي نقطة على حافتها مسافة قدرها s حول المركز وتعريف الزاوية θ مقدرة بالزاوية النصف قطرية بالنسبة بين s ونصف قطر العجلة r :

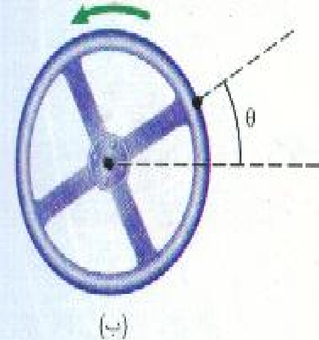
$$\theta\,(\text{rad}) = \frac{s}{r} \tag{7-1}$$

لاحظ أن الدورة الكاملة تناظر $s = 2\pi r$ وهذا يعطي $\theta = 2\pi r/r = 2\pi\ \text{rad}$. هذا ومن المفيد تذكر العلاقتين الآتيتين :

$$1\ \text{rev} = 360° = 2\pi\ \text{rad}$$

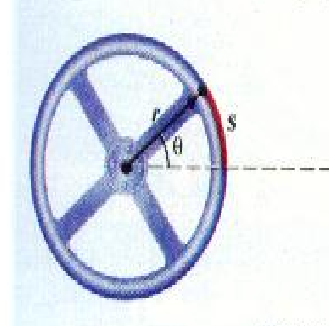
$$1\ \text{rad} = \frac{180}{\pi}\ \text{degrees} \cong 57.3°$$





شكل 1-7 :
الزاوية θ تصف المسافة الزاوية التي دارتها العجلة .

لاحظ أن الدرجات والدورات والزوايا النصف قطرية كلها كميات **لا بعدية** ، أي أنها لا تتضمن أي أبعاد أساسية للقياسات الفيزيائية . وبناء على ذلك ، إذا دخلت هذه الكميات في أي عملية حسابية فإنها لا تغير وحدات حدود المعادلة المستعملة . ومع ذلك من المهم التنبه إلى الطريقة التي تقاس بها الزاوية حتى يمكن تفسير نتائج الحسابات تفسيرًا صحيحًا . وسوف نرى في القسم 5-7 أن **من الضروري** في حالات معينة أن تكون الزوايا معطاة بالزوايا النصف قطرية حتى يكون الحساب صحيحًا .



شكل 2-7 :
$\theta = s/r$ بالقياس نصف القطري .



حول الزاوية $70.0°$ إلى زوايا نصف قطرية ودرجات .

استدلال منطقي : باستعمال معاملي التحويل $2\pi\ \text{rad}/360°$ و $1\ \text{rev}/360°$ نجد أن :

$$70.0° = (70.0\ \text{deg})\left(\frac{2\pi\ \text{rad}}{360\ \text{deg}}\right) = 1.22\ \text{rad}$$

$$70.0° = (70.0\ \text{deg})\left(\frac{1\ \text{rev}}{360\ \text{deg}}\right) = 0.194\ \text{rev}$$

تمرين : حول الزاوية $0.210\ \text{rad}$ إلى درجات ودورات . **الإجابة** : $0.0334\ \text{rev}$ و $12.0°$

جدول 1-7
بعض الزوايا الشائعة الاستعمال مقاسة بالدرجات والزوايا النصف قطرية

درجات	زوايا نصف قطرية
20°	π/9
30°	π/6
36°	π/5
45°	π/4
60°	π/3
90°	π/2

2-7 السرعة الزاوية ω

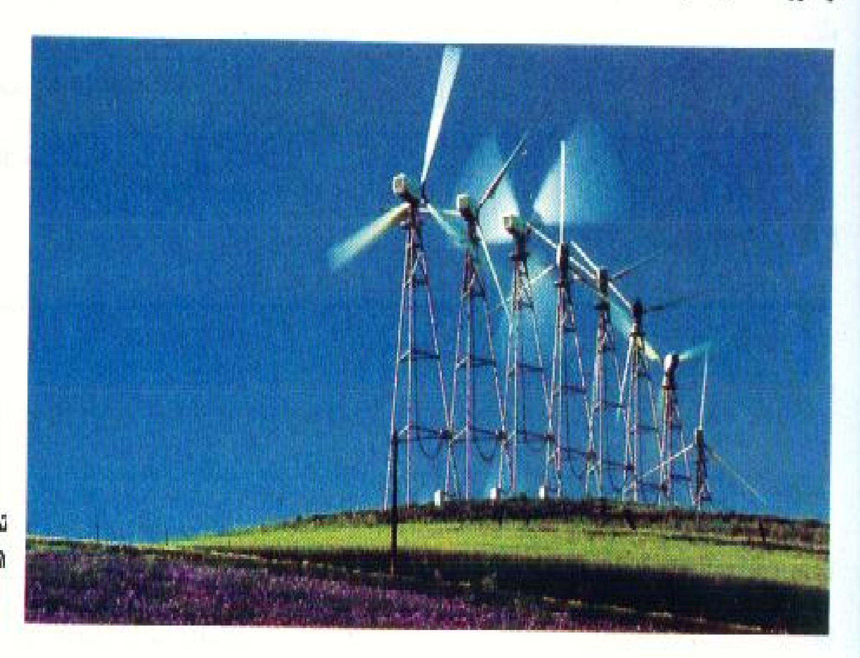
عندما نقول أن أسطوانة الفونوغراف تدور بمعدل 33 rev/min فإننا في الواقع نذكر سرعتها الزاوية ، أي أننا نصف سرعة دورانها . وكما في حالة الحركة الخطية حيث

تعرف السرعة المتوسطة بأنها الإزاحة مقسومة على الزمن ، فإننا نعرف السرعة الزاوية المتوسطة بالعلاقة :

$$\text{السرعة الزاوية المتوسطة} = \frac{\text{الإزاحة الزاوية}}{\text{الزمن المار}}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\theta}{t} \qquad (7\text{-}2)$$

حيث ω (الحرف اللاتينى أوميجا) هى السرعة الزاوية . والوحدات النموذجية للسرعة الزاوية ω هى الزاوية النصف قطرية لكل ثانية ، والدرجات لكل ثانية . والدورات لكل دقيقة .



تستخدم الطواحين الهوائية الحديثة سرعتها الزاوية لتشغيل المولدات الكهربائية .

من الممكن أن تدور العجلتان الموضحتان فى الشكلين 1-7 و 2-7 فى « اتجاهين » مختلفين : اتجاه دوران عقارب الساعة وعكس اتجاه دوران عقارب الساعة . وقد ناقشنا هذين الاتجاهين للدوران حول محور فى الفصل الرابع عند دراسة عزم الدوران والشرط الثانى للاتزان . والإزاحة الزاوية θ والسرعة الزاوية ω حول محور ثابت متجهان مثل عزوم الدوران ، يمكن أن يكون لأى منهما أحد اتجاهين متضادين للدوران . وعادة يعتبر الدوران فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة موجبًا وفى اتجاه دوران عقارب الساعة سالبًا ؛ وهذا هو نفس الاختيار الذى تبعناه مع عزوم الدوران فى الفصل الرابع . ومن ثم فإن المعادلات المحتوية على كميات زاوية سوف تعطى إجابات يمكن تفسيرها بما يتفق مع هذا الاختيار .

وكما فعلنا فى حالة الحركة الخطية لابد من تمييز السرعة الزاوية المتوسطة عن السرعة اللحظية . ولعلنا نذكر أن السرعة الخطية اللحظية تستنتج بقياس الإزاحة الخطية للجسم المتحرك فى زمن صغير جدًا بحيث لا تتغير السرعة تغيرًا ملحوظًا . وبتطبيق نفس الأسلوب على حالة الحركة الدورانية ، تعرف **السرعة الزاوية اللحظية** كالآتى :

$$\omega = \lim_{\Delta t \to 0} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \qquad (7\text{-}3)$$

فى المعادلة السابقة تمثل $\Delta\theta$ المسافة الزاوية الصغيرة التى تتحركـها عجلة خـلال زمـن قصير Δt ، ويبين لنا رمز النهاية lim أن قيمة هذه النسبة يجب تعيينـها عندمـا تقترب الفترة الزمنية Δt من الصفر كما وضحنا فى الفصل الثانى .

مثال توضيحى 2-7

تدور العجلة الموضحة فى الشكل 2-7 عددًا من الدوران مقـداره 1800 rev فـى 1.0 min . أوجد السرعة الزاوية المتوسطة بالوحدات rad/s .

استدلال منطقى : من معادلة تعريف السرعة الزاوية المتوسطة :

$$\bar{\omega} = \frac{\theta}{t} = \frac{1800}{60\ \text{s}} = 30\ \text{rev/s}$$

إذن :

$$30\ \text{rev/s} = \left(30\frac{\text{rev}}{\text{s}}\right)\left(\frac{2\pi\ \text{rad}}{\text{rev}}\right) = 60\pi\ \text{rad/s} = 190\ \text{rad/s}$$

تمرين : كم زاوية نصف قطرية تدورها العجلة فى 15 s ؟ **الإجابة** : 47 rad .

3-7 العجلة الزاوية α

سبق تعريف العجلة الخطية المتوسطة فى الفصل الثانى بالمعادلة :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_i}{t}$$

هذه الكمية مقياس لمعدل تغير سرعة الجسم بالنسبة للزمن ، حيث $\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_i$ هـو التغير فى السرعة خلال الزمن t . تذكر أن الوحدات النموذجية للعجلة هى m/s^2 أو ft/s^2 .

وفى حالة الأجسام الدائرة كثـيرًا مـا يـهمنا معرفـة كيـف تتسـارع هـذه الأجسـام أو تتباطئ ، وهو ما يعبر عنه **بالعجلة الزاوية** ، أى المعدل الزمنى لتغير السرعة الزاوية .

وتعرف العجلة الزاوية المتوسطة α (ألفا) لعجلة دائرة أو أى جسم آخر بالعلاقة :

$$\text{العجلة الزاوية المتوسطة} = \frac{\text{التغير فى السرعة الزاوية}}{\text{الزمن المار}}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t} \qquad (7\text{-}4)$$

وحدات العجلة الزاوية هى وحدات السرعة الزاوية مقسومة على الزمن . فمثلاً ، إذا كـان t مقاسًا بالثوانى وكانت ω مقاسة بالزاوية نصف القطرية لكل ثانيـة فـإن العجلـة الزاويـة

يعبر عنها بالزاوية نصف القطرية فى الثانية لكل ثانية . وبالرغم من أنه ليس من الخطأ قياس ω بالزاوية نصف القطرية فى الثانية عندما يكون t مقاسًا بالدقيقة بحيث تكون الوحدة عندئذ زاوية نصف قطرية فى الثانية لكل دقيقة ؛ فإن من الأفضل عمومًا استخدام نفس وحدة t فى الكميتين :

إذا كانت العجلة الزاوية منتظمة (ثابتة) فإن السرعة الزاوية المتوسطة ، كما فعلنا فى حالة الحركة الخطية ، ستكون :

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_f + \omega_i)$$

مثال توضيحى 3-7

تبدأ عجلة فى الدوران من السكون وتصل إلى سرعة دورانية قدرها 240 rev/s فى 2.0 min . ما عجلتها الزاوية المتوسطة ؟

استدلال منطقى : نعلم أن :

$$\omega_i = 0 \qquad \omega_f = 240 \text{ rev/s} \qquad t = 2.00 \text{ min} = 120 \text{ s}$$

ومن تعريف العجلة الزاوية نجد أن :

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t} = \frac{(240-0)\text{ rev/s}}{120\text{ s}} = 2.00 \text{ rev/s}$$

تمرين : ما مقدار السرعة الزاوية للعجلة (بالزاوية نصف القطرية فى الثانية) بعد 130 s من لحظة بداية دورانها من السكون ؟ **الإجابة** : 1630 rad/s .

7-4 معادلات الحركة الزاوية



يعطى الأطفال للمائدة الدوارة عجلة زاوية بالدفع مماسيًا على محيطها .

ربما أدركنا الآن أن هناك قدرًا كبيرًا من التشابه بين معادلات الحركة الخطية والدورانية . فالزاوية θ فى الحركة الزاوية تناظر x فى الحركة الخطية ، كما أن ω تناظر v ، وأخيرا α تناظر a . كذلك فإننا عرفنا ω و α بمعادلتين مماثلتين لمعادلتى تعريف v و a ، رغم أننا استعملنا رموزًا مختلفة . من هذا يستنتج أن كل معادلات الحركة ذات العجلة الزاوية المنتظمة ستكون على نفس صورة نظيراتها فى حالة الحركة ذات العجلة الخطية المنتظمة ، وهذا موضح فى الجدول الآتى (الصفحة التالية) .

ليست هناك إذن حاجة لتعلم معادلات جديدة للحركة الزاوية ؛ كل ما علينا ببساطة أن نستبدل متغيرات الحركة الخطية بما يقابلها فى حالة الحركة الزاوية . وسوف نرى فى هذا الفصل أن ذلك ينطبق أيضًا على معادلات طاقة الحركة وكمية التحرك . وسوف نرى الآن كيف نستخدم نفس طرق حل مسائل الحركة الخطية فى حل مسائل الحركة الزاوية .

الحركة الزاوية	الحركة الخطية	
$s = \bar{v}\, t$	$\theta = \bar{\omega}\, t$	(5-7أ)
$v_f = v_i + at$	$\omega_f = \omega_i + at$	(5-7ب)
$\bar{v} = \frac{1}{2}\left(v_f + v_i\right)$	$\bar{\omega} = \frac{1}{2}\left(\omega_f + \omega_i\right)$	(5-7جـ)
$2as = v_f^2 - v_i^2$	$2\alpha\theta = \omega_f^2 - \omega_i^2$	(5-7د)
$s = v_i\, t + \frac{1}{2}at^2$	$\theta = \omega_i\, t + \frac{1}{2}at^2$	(5-7هـ)

مثال 1-7

تدور عجلة روليت بمعدل 3.0 rev/s وتتهادى إلى السكون خلال 18.0 s ما قيمة تقاصرها (عجلتها السالبة) ؟ كم دورة تدورها العجلة أثناء وصولها إلى السكون ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هى الكميات المعطاة والكميات المطلوب إيجادها ، $t = 18.0\ s$ ؟

الإجابة : المعطيات هى $\omega_i = 3.00\ rev/s$ ، $\omega_f = 0\ s$ ، $t = 18.0\ s$. المطلوب هو إيجاد α و θ .

سؤال : أى معادلات الحركة تربط المجاهيل بالمعطيات ؟

الإجابة : تعريف α (المعادلة 4-7) يحتوى على ω و t .

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_i}{t}$$

ولإيجاد θ يمكن استخدام المعادلة (5-7) إذا لم تكن α معلومة مقدمًا . وبما أننا نعلم قيمة α . يمكن اختيار أى من المعادلتين (5-7د) أو (5-7هـ) لإيجاد θ :

الحل والمناقشة : العجلة الزاوية هى :

$$\alpha = \frac{0 - 3.00\ rev/s}{18.0\ s} = -0.167\ rev/s^2$$

الإشارة السالبة هامة لأنها تبين تقاصر العجلة . باستخدام المعادلة (5-7جـ) نجد أن :

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(0 + 3.00\ rev/s) = 1.50\ rev/s$$

ومن المعادلة (5-7أ) نحصل على :

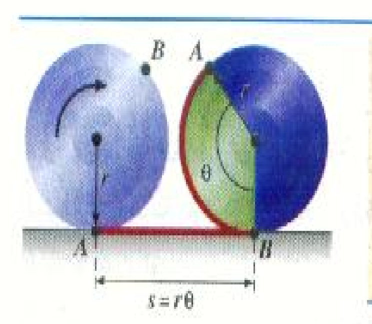
$$\theta = \bar{\omega}\, t = (1.50\ rev/s)(18.0\ s) = 27.0\ rev$$

يمكن أيضًا إيجاد θ باستخدام المعادلة (5-7هـ) :

$$\theta = (3.00 \text{ rev/s})(18.0 \text{ s}) + \frac{1}{2}(-0.167 \text{ rev/s}^2)(18.2 \text{ s})^2$$
$$= 27.0 \text{ rev}$$

لاحظ مدى أهمية مراعاة صحة إشارة α .

تمرين : استخدم المعادلة (7-5د) لإيجاد θ .



شكل 7-3 :
حينما تدور العجلة زاوية θ علــى الأرض فإنها ترسم علــى الأرض مســافة مماسـية قدرها $s = r\theta$.

7-5 الكميات الماسية

حيث يفك مكب (بكرة الخيط) خيطاً ملفوفاً عليه أو تتدحرج عجلة على الأرض بـدون انزلاق تحدث حركتان فى نفس الوقت ، إحداهمـا دورانيـة والأخـرى خطيـة ، والمطلـوب الآن هو إيجاد العلاقة بـين هذيـن النوعـين مـن الحركـة . من المعلـوم أن العلاقـة بـين المسافتين الخطية s والزاوية θ تمثلـها المعادلة (7-1) وهى معادلة تعريف القيـاس الزاوى . ولإيضاح ذلك لنرجع إلى الشكل 7-3 .

يوضح هذا الشكـل أن المسافة الخطيـة التـى تتدحرجـها العجلـة s تساوى المسافة الماسية التى تقطعها أى نقطة على حافتها ؛ هذا يمكننا من إيجاد علاقة بـين الحركـة الخطية والحركة الدورانية للعجلة المتدحرجة . وطالمـا لم تعـان العجلـة أى انـزلاق فـإن $s = r\theta$ ، حيث θ مقاسة بالزاوية نصف القطرية . عـلاوة علـى ذلـك إذا نظرنـا إلى المكـب الموضح فى الشكل 7-4 سنرى أن هناك علاقة مشابهة لطريقة لف الخيط على حافتــه . وبدوران المكب بإزاحة زاوية قـدرها θ يلتف طول قدره s مـن الخيط عـلى حافة المكب . إذن ، فى جميع الحالات تحقق العلاقة :

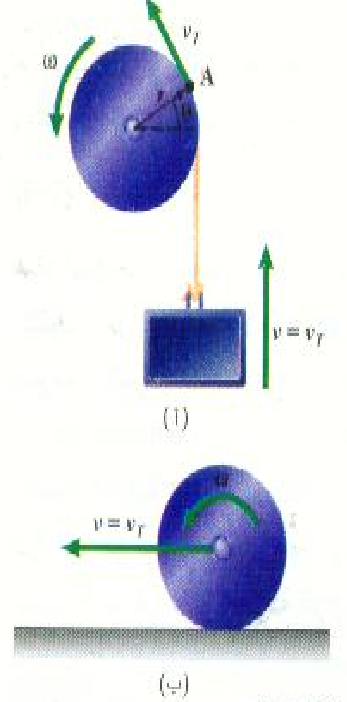


شكل 7-4 :
ما طول الخيط الذى يلتف على المكــب عنــد دورانه دورة واحدة ؟

$$s = r\theta \quad (\text{بالزاوية نصف القطرية } \theta) \qquad (7\text{-}6)$$

لاحظ مرة أخرى أن θ فى هذه الحالات يجب أن تكون مقاسة بالزاويـة نصـف القطريـة لأن المعادلة (7-6) مبنية على أساس تعريف القياس الزاوى .

وعندما يدور المكب المبين بالشكل 7-4 بمعدل معين سوف ترتفع الكتلة المعلقة فى طرف الخيط بسـرعة معينة . بالمثل ، عندما تتدحرج العجلة الموضحة بالشكل 7-3 على الأرض بدون انزلاق فإنها تدور حول محورها بمعدل معـين ويتحـرك مركزهـا فـى نفـس الوقت بسرعة معينة . فى كل من هاتين الحالتين يكـون مقدار السـرعة مسـاويًا لمقدار سرعة أى نقطة على حافة المكب أو العجلة . ويقـال عندئـذ أن أى نقطـة علـى الحافـة تتحرك دائمًا بنفس هذا المعدل فى اتجـاه مماسى للمكب أو العجلـة ؛ وتسـمى سـرعة حركة أى نقطة على لحافة بالسرعة الماسية v_T لـهذه النقطـة . لنحـاول الآن إيجـاد علاقة بـين السـرعة الماسية v_T والسرعة الزاوية ω للعجلة .



شكل 7-5 :
ترتبـط الســرعة الزاويـة ω بالســرعة المماسية v_T طبقًا للعلاقة $v_T = \omega r$. فى هذه العلاقة يجــب أن تكــون ω مقــدرة بالقياس الزاوى .

إذا دار المكب فى الشكل 7-5أ بسرعة ثابتة المقدار زاويـة θ خـلال الزمـن t ستكون سرعته الزاوية $\omega = \theta / t$. وحيث أن $\theta = s / r$ ، حيث r نصف قطر المكـب ؛ يمكننـا التعويض بهذه القيمة فى معادلة ω لنحصل على :

$$\omega = \frac{s/r}{t} = \frac{s}{t}\frac{1}{r}$$

ولكن s/t ببساطة هـو مقدار سرعة ارتفاع الكتلة فـى الشكل 5-7أ وهو يساوى مـقدار السرعة الماسـية v_T للنقطـة A . وهكـذا فإن هـذه المعادلـة للسـرعة الزاويـة ω تعطـى : $\omega = v_T/r$ ، أو :

$$v_T = \omega r = \text{مقدار السرعة الماسية} \qquad (7\text{-}7)$$

وهنا أيضًا يجب استخدام القياس نصف القطرى . وبطريقة مشابهة يمكننـا إثبـات أن مركـز العجلة فى الشكل 5-7ب يتحرك أيضًا بسرعة مقدارها $v_T = \omega r$. بشرط عدم انـزلاق العجلة . ومـن ثم يمكننـا أن نـرى أن المعادلـة (7-7) هـى علاقـة هامـة بـين الحركـة الدورانية لجسم وحركته الخطية الناتجة عن الدوران .

هناك كمية هامة أخرى تسـمى العجلـة الماسـية . فعندمـا تزيـد السـرعة الزاويـة للعجلة الدائرة سـوف تزداد v_T بالضرورة . وباستعمال المعادلة (4-7) نجد أن العجلـة الزاوية α هى :

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_i}{t}$$

حيث $\omega_f - \omega_i$ هـو التغير فـى السرعة الزاوية خـلال الفـترة الزمنية t . ونظرًا لأن $\omega = v_T/r$ يمكننا كتابة العلاقة السابقة على الصورة :

$$\alpha = \frac{v_{Tf} - v_{Ti}}{rt} \qquad \text{أو} \qquad \frac{v_{Tf} - v_{Ti}}{rt} = \alpha r$$

هـذا ببساطة هو معدل تغير مقدار السرعة الماسية ، أو مقدار **العجلة الماسية a_T** . وعليه فإن مقدار a_T يرتبط بالعجلة الزاوية طبقًا للعلاقة :

$$a_T = \alpha r \qquad (7\text{-}8)$$

هـذه أيضًا هـى العجلة الخطية لمركز العجلة المتدحرجة أو أى نقطة معينة على الخيط المفكوك . هل يمكنك إثبات ذلك على أسـاس تعريـف العجلـة بأنـها معـدل التغير فـى السرعة - السرعة الماسية فى هذه الحالة ؟

المعادلات (6-7) ، (7-7) ، (8-7) تبين أنه بالرغم من أن قيم الإزاحة والسرعة والعجلة **الخطية** تختلف من نقطة إلى أخرى على الجسم الدائر ، ويعتمد ذلك على بعـد كل نقطة عن محور الدوران ، فإن جميـع النقـط الواقعـة علـى الجسم الدائـر المتماسـك تشترك كلها فى نفس **الحركة الزاوية** .

مثال 2-7

تبـدأ سيارة قطر عجلاتها 80 cm الحركة مـن السكون وتتسـارع بانتظام إلى 20 m/s خلال 9.0 s . أوجد العجلة الزاوية والسرعة الزاوية النهائية لإحدى العجلات .

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا تصف المعطيات ؟

الإجابة: العجلة الخطية للسيارة . كذلك يتضمن نص المسالة قطر العجلات التى يفترض أنها تتدحرج إلى الطريق بدون انزلاق .

سؤال : بعد إيجاد العجلة الخطية للسيارة كيف يمكن ربطها بالعجلة الزاوية لإحدى عجلاتها ؟

الإجابة : العجلة الخطية للسيارة هى نفس العجلة الخطية لمحور دوران العجلة (الدنجل) . وتوضح المعادلتان (7-7) و (7-8) والشكل 5-7ب أن الحركة الزاوية ترتبط بالحركة الخطية طبقاً للعلاقتين :

$$\omega = \frac{v_T}{r} \quad \text{و} \quad \alpha = \frac{a_T}{r}$$

الحل والمناقشة : نوجد أولاً العجلة الخطية للسيارة :

$$a_T = \frac{v_f - v_i}{t} = \frac{20\ \text{m/s} - 0}{9.0\ \text{s}} = 2.2\ \text{m/s}^2$$

وعليه فإن العجلة الزاوية تكون :

$$\alpha = \frac{2.2\ \text{m/s}^2}{0.40\ \text{m}} = 5.6\ \text{s}^{-2} = 5.6\ \text{rad/s}^2$$

لاحظ عدم وجود أى شيء يدل صراحة على أن الكمية الماسية مقدرة بالقياس نصف القطرى . هذا موجود ضمنيًا فى استخدام المعادلات (7-6) ، (7-7) ، (7-8) .

وهكذا إن السرعة الزاوية النهائية تكون :

$$\omega = \alpha t = (5.6\ \text{rad/s}^2)(9.0\ \text{s}) = 50\ \text{rad/s}$$

تمرين : ما عدد الدورات التى تدورها كل من عجلات السيارة خلال 9.0 s ؟

الإجابة : 36 rev .

مثال 3 - 7

افترض فى تجربة كالمبينة بالشكل 5-7أ أن الكتلة تبدأ من السكون وتتسارع إلى أسفل بمعدل $8.6\ \text{m/s}^2$. إذا كان نصف قطر المكب 20 cm ، ما معدل دورانها بعد 3.0 s ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف ترتبط حركة الكتلة بدوران المكب ؟

الإجابة: من خلال نصف قطر المكب ، لأن الخيط الذى يحمل الكتلة ملفوف حول محيط المكب وينفك بدون انزلاق .

سؤال : ما العلاقة بين العجلة الزاوية للمكب والعجلة الخطية للكتلة إلى أسفل ؟

الإجابة:

$$\alpha = \frac{a_T}{r}$$

سؤال : ما علاقة معدل الدوران بالعجلة الزاوية α ؟

الإجابة: معدل الدوران هو السرعة الزاوية ، وتعطى بالعلاقة :

$$\omega = \alpha t$$

الحل والمناقشة : القيمة العددية هي :

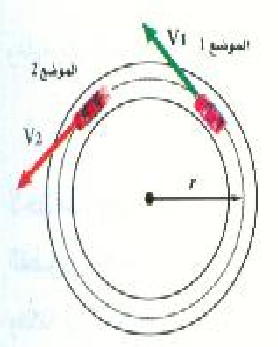
$$\alpha = \frac{8.6 \text{ m/s}^2}{0.20 \text{ m}} = 43 \text{ rad/s}^2$$

و

$$\omega = \alpha t = (43 \text{ rad/s}^2)(3.0 \text{ s}) = 130 \text{ rad/s}$$

لاحظ مرة أخرى ضرورة أن تفهم أن القياس الزاوى هو المستخدم في الحل .

7-6 العجلة الجاذبة المركزية



شكل 7-6 : مع أن مقدار سرعة السيارة ثابت عند أى موضع على المسار فإن سرعتها تتغير باستمرار لأن اتجاه متجه السرعة ليس ثابتًا .

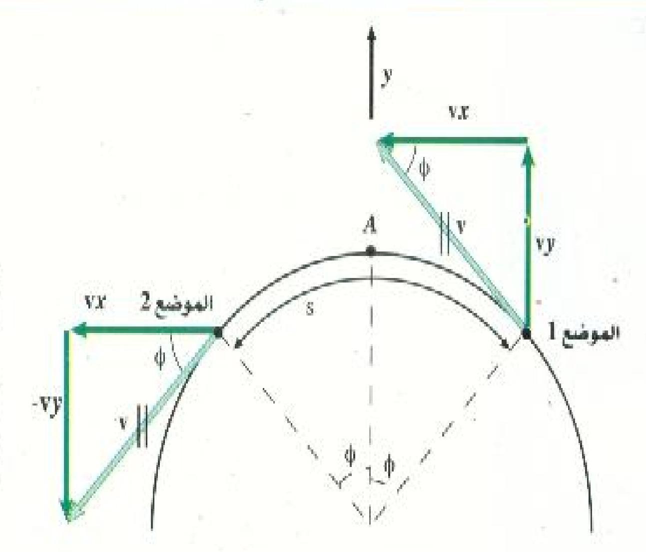
تمثل حركة الجسم في مسار دائرى بسرعة ثابتة المقدار موقفًا على قدر كبير من الأهمية . فمثلًا ، اعتبر حالة سيارة تسير في مسار دائرى بسرعة ثابتة المقدار v ، وليكن 20 m/s ، كما هو مبين بالشكل 7-6 . بالرغم من أن مقدار سرعة السيارة 20 m/s عند الموضعين 1 و 2 وعند جميع النقط الأخرى على المسار ، إلا أن السيارة تعانى **عجلة** معينة . ولفهم هذه العبارة يجب أن نتذكر حقيقتين : (1) مقدار السرعة والسرعة نفسها ليسا نفس الشيء ، (2) تعرف العجلة بأنها المعدل الزمني لتغير السرعة (كمية متجهة) وليس المعدل الزمني لتغير مقدار السرعة (كمية غير متجهة) . وحيث أن اتجاه السرعة عند الموضع 1 ليس هو اتجاهها عند الموضع 2 ، فإن السرعة تتغير أثناء حركة السيارة في المسار . ومن تعريف العجلة المتوسطة نجد أن العجلة المتوسطة للسيارة بين الموضعين 1 و 2 يعطى بالعلاقة :

$$\bar{a} = \frac{\text{التغير في السرعة}}{\text{الزمن المار}}$$

لنحسب الآن عجلة السيارة .

بالاستعانة بالشكل 7-7 الذى يمثل نفس الموقف نلاحظ أن المركبة y لسرعة السيارة تتغير من v_y عند الموضع 1 إلى $-v_y$ عند الموضع 2 ، بينما تظل المركبة x ثابتة عند الموضعين . من هذا نجد أنه عندما تنتقل السيارة من 1 إلى 2 ستتغير مركبة سرعة السيارة بمقدار :

$$(\text{التغير في السرعة})_y = v_{yf} - v_{y0} = -v_y - v_y = -2v_y$$



شكل 7-7 :
لاحظ أن سرعة السيارة تتغير بمقدار $-2v_y$ عند انتقالها من الموضع 1 إلى الموضع 2 . وتبين الإشارة السالبة أن هذا التغير فى الاتجاه السالب للمحور y ، أى اتجاه مركز الدائرة .

كذلك فإن الزمن الذى تستغرقه السيارة للانتقال من 1 إلى 2 هو $t = s/v$ ، حيث v السرعة الماسية الثابتة المقدار للسيارة فى مسارها و s طول القوس من 1 إلى 2 . وحيث أن $\theta = s/r$ ، من تعريف القياس نصف القطرى ، إذن :

$$2\phi = \frac{s}{r} \qquad \text{أو} \qquad s = 2r\phi$$

وذلك لأن s تقابل زاوية قدرها 2ϕ فى هذه الحالة . وعليه :

$$t = \frac{s}{v} = \frac{2r\phi}{v}$$

نعلم الآن أن التغير فى السرعة هو $-2v_y$ وأن الزمن المار هو $\frac{2r\phi}{v}$.

وهكذا :

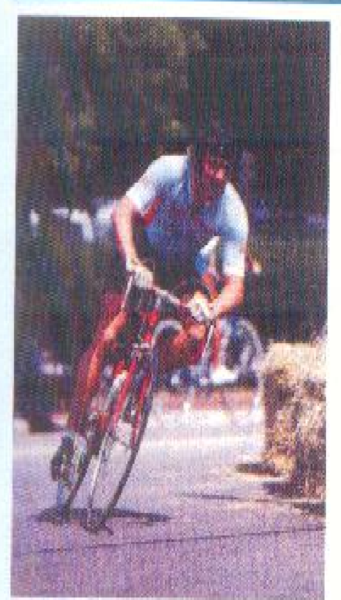
$$\bar{a} = \frac{\text{التغير فى السرعة}}{\text{الزمن المار}} = \frac{-2v_y}{2r\phi/v} = -\frac{v_y}{r\phi}$$

ولكننا نرى من الشكل 7-7 أن $v_y = v\sin\phi$ ، إذن :

$$\bar{a} = \frac{v^2\sin\phi}{r\phi}$$

هذه هى العجلة المتوسطة للسيارة أثناء الحركة من الموضع 1 إلى الموضع 2 . ولكن ما يهمنا هو قيمة العجلة اللحظية a عند أى نقطة مثل A ، وللحصول على العجلة اللحظية علينا ببساطة تقليل ϕ حتى تصل إلى قيمة صغيرة جداً . ولكن $\sin\phi \cong \phi$ عندما تكون ϕ زاوية صغيرة مقدرة بالقياس نصف القطرى (استخدم حاسبة الجيب للتأكد من أن هذا صحيح) ، إذن ، العجلة اللحظية تكون :

$$a = \frac{v^2\sin\phi}{r\phi} \cong -\frac{v^2\phi}{r\phi} = -\frac{v^2}{r}$$


حدد مواضع القوى المؤثرة على الدراجة والراكب عند عبور المنحنى . لماذا يجب أن يميل الراكب والدراجة إلى داخل المنحنى ؟

هذه هى عجلة السيارة عند مرورها بالنقطة A . وحيث أن مقدار السرعة ثابت فإن جميع النقط الواقعة على الدائرة متكافئة ، ومن ثم يكون مقدار العجلة $a = v^2 / r$ مهما كان موضع A على الدائرة .

لنحاول الآن إيجاد اتجاه هذه العجلة . تذكر أن اتجاه $\mathbf{a}$ ، طبقًا للتعريف ، هو نفس اتجاه $\Delta\mathbf{v}$. وبالاستعانة بالشكل 7-7 نجد أن $\Delta\mathbf{v} = -2v_y$ عند النقطة A ، وتبين الإشارة السالبة أن $\Delta\mathbf{v}$ متجه يشير من النقطة A فى اتجاه الجزء السالب من المحور y ، أى تجاه مركز الدائرة . وعليه فإن $\Delta\mathbf{v}$ (وأيضًا $\mathbf{a}$) عند A **متجه يشير تجاه مركز الدائرة** . ولكن النقطة A يمكن أن تكون **أى** نقطة نختارها على الدائرة ، كما يمكن اختيار المحور y بحيث يمر **بأى** نقطة نختارها . ومن ثم فإن استنتاجنا الذى توصلنا إليه باختيار هذه النقطة بالذات هو استنتاج عام تمامًا ، وينطبق على جميع النقط الواقعة على الدائرة . وتلخيصًا لذلك نقول :

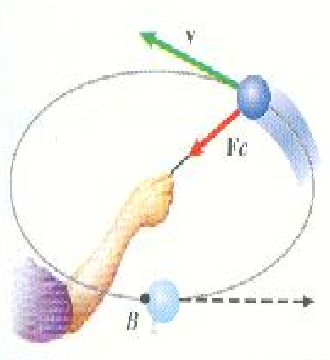
أى جسم متحرك بسرعة ثابتة القدار فى مسار دائرى نصف قطره r يقع تحت تأثير عجلة تتجه نحو مركز الدائرة . هذه العجلة تسمى **العجلة الجاذبة المركزية** $\mathbf{a}_c$ (حرفيًا « الباحثة عن المركز ») ، ومقدار هذه العجلة هو :

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \qquad (7\text{-}9)$$

حيث استخدمنا العلاقة $v = \omega r$.

العجلة $\mathbf{a}_c$ تصف معدل الانعطاف ، بمعنى أنها تمثل معدل تغير **اتجاه الحركة** .

7-7 القوة الجاذبة المركزية



شكل 7-8 :
إذا انقطع الخيط عند وجود الكرة فى النقطة B سوف تتبع الكرة الخط المماسى المتقطع .

ينص قانون نيوتن الثانى على أنه إذا أريد لجسم أن ينحرف عن الحركة فى خط مستقيم يجب أن يؤثر عليه صافى قوة معين . وعليه فإن الجسم المتحرك فى مسار دائرى لابد وأن يكون واقعًا تحت تأثير صافى قوة معين يسبب انحرافه عن المسار الخطى المستقيم . فمثلاً ، إذا كان المضمار الدائرى فى الشكل 7-6 زلق جدًا بحيث لا يولد قوة الاحتكاك الضرورية على العجلات فإن السيارة سوف تنزلق خارج الضمار فى خط مستقيم مماس للدائرة . وبالمثل ، تستمر الكرة الموضحة بالشكل 7-8 فى الحركة فى مسارها الدائرى تحت تأثير قوة الشد فى الخيط ، واتجاهها نحو المركز . وإذا انقطع الخيط عند مرور الكرة بالنقطة B فإن الكرة سوف تأخذ المسار الخطى المستقيم المثل بالخط المماسى للدائرة .

ونظرًا لأننا نعلم الآن ما يكفى عن العجلة الجاذبة المركزية ، لن يكون حساب القوة اللازمة لحفظ جسم كتلته m فى مسار دائرى عملاً صعبًا . ذلك أن الجسم المتحرك فى مسار دائرى يقع تحت تأثير عجلة تجاه مركز الدائرة ، ومقدار هذه العجلة هو $\mathbf{a}_c = v^2/r$ ،

حيث r نصف قطر الدائـرة و v مقدار السرعة المماسية للجسم فـى المسار الدائـرى . ولتوليد هذه العجلة لابد أن تؤثر على الجسم قوة شد فى نفس اتجاه العجلة ؛ أى تجاه مركز الدائرة . هذه هى القوة $\mathbf{F}_c$ فى الشكل 8-7 على سبيل المثال . وباستخدام العلاقـة $\mathbf{F}_{net} = m\mathbf{a}$ نستطيع إيجاد هذه القوة المطلوبـة ، والمسماة **بالقوة الجاذبـة المركزيـة** ، ويعطى مقدارها بالعلاقة :

$$F_c = ma_c = \frac{mv^2}{r} \qquad (7\text{-}10)$$

القوة اللازمة لحفظ جسم كتلته m يتحرك بسـرعة مقدارهـا v فـى مسار دائـرى نصف قطره r تسمى القوة الجاذبة المركزية ، ومقدارها يـساوى mv^2/r . اتجاه هذه القوة نحو مركز الدائرة .

هذا وسوف نقابل فيما بعد العديد من الأمثلة الأخرى للقوى الجاذبة المركزية مثل القوى الناتجة عن الجاذبية والتى تسبب دوران الأقمار حول الأرض فى مدارات دائرية والقوى المغناطيسية التى تسبب الحركة الدائرية للجسيمات المشحونة بشحنات كهربائية .

من الأهمية بمكان ملاحظة أن القوة الجاذبة المركزية لا تبـذل شغـلاً . فلكـى تبـذل القوة شغلاً يجب أن يكون لـها مركبة فى اتجاه الحركة . ولكن القوة الجاذبـة المركزيـة متجه فى اتجاه نصف قطر الدائرة إلى الداخل ، بينما تحدث الحركة فى الاتجاه المماسى للدائرة . وحيث أن المماس للدائرة عمودى على نصف القطـر فلـن يكـون للقـوة الجاذبـة المركزية مركبة فى اتجاه الحركة ، ومن ثم فإنها لا تبـذل شغـلاً . كـل مـا تفعلـه القـوة الجاذبة المركزية هو أنها ببساطة تغير اتجاه حركة الجسم .

ويمكن تلخيص تأثيرى القوى على سرعة جسم فيما يلى :

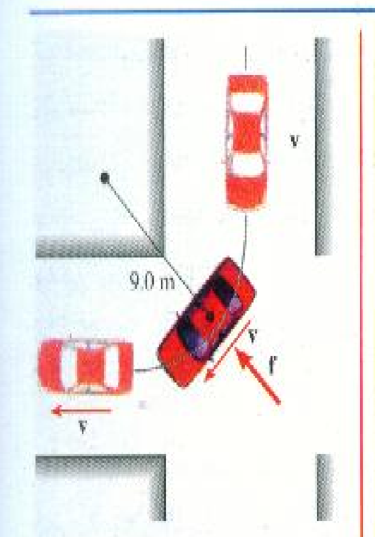
القوة المماسية ، أو الموازية لاتجاه الحركة تغير مقدار سرعة الجسم فقط وتستطيع أن تبذل الشغل عليه . أما القوى العمودية على اتجاه الحركة فتغير تجاه حركة الجسم فقط ولكنها لا تبذل عليه شغلاً .

مثال 4-7

تنعطف سيارة كتلتها 1200 kg عند ناصية شارعين بسرعة مقدارهـا 8.0 m/s وتتحـرك فـى هذه العملية فى مسار على هيئة قوس من دائرة (شكل 9-7) . (أ) إذا كان نصف قطر هـذه الدائرة 9.00 m ، فمـا مقدار القـوة الأفقيـة التـى يجب أن يؤثر بـها رصف الطريـق علـى الإطارات بحيث تحفظ السيارة فـى المسار الدائـرى ؟ (ب) مـا هـى القيمـة الصغـرى لمعامل الاحتكاك اللازم حتى لا تنزلق السيارة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما قيمة عجلة السيارة عند انعطافها حول الناصية ؟



شكل 7-9 :
لكي تتمكن السيارة من الانعطاف حول الناصية يجب أن تولد قوة الاحتكاك f بين الإطارات ورصف الطريق القوة الجاذبة المركزية اللازمة لحفظ السيارة فى مسار دائرى .

الإجابة : العجلة الجاذبة المركزية هى :

$$\mathbf{a}_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(8.00 \text{ m/s})^2}{9.00 \text{ m}} = 7.11 \text{ m/s}^2$$

سؤال : ما مقدار القوة اللازمة لتحقيق ذلك ؟

الإجابة : $F = ma = (1200 \text{ kg})(7.11 \text{ m/s}^2) = 8530 \text{ N}$

سؤال : فيما يختص بالجزء (ب) ، ما علاقة هذه القوة بمعامل الاحتكاك ؟

الإجابة : يجب أن يركز السائق على الاحتكاك الاستاتيكى بين الإطارات والطريق حتى تنعطف سيارته بأمان . أما إذا انزلقت الإطارات فستكون قوة الاحتكاك بين الإطارات والطريق قوة احتكاك حركي ، وهى دائمًا أقل من قوة الاحتكاك الاستاتيكى . والقيمة العظمى لقوة الاحتكاك الاستاتيكى فى هذه الحالة هى :

$$f_s(\max) = \mu_s F_N = \mu_s mg$$

الحل والمناقشة : μ_s يجب أن تساوى $(8530 \text{ N}) / mg$ على الأقل . وعليه :

$$\min \mu_s = \frac{8530 \text{ N}}{(1200 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)} = 0.725$$

لاحظ أن الوحدات فى هذه المعادلة تختصر كلها وتكون النتيجة عددًا لا بعديًا .

مثال 5-7

تتأرجح كرة مربوطة فى طرف خيط فى دائرة رأسية نصف قطرها r كما هو مبين بالشكل 10-7 . ما قيمة الشد فى الحبل عندما تكون الكرة عند النقطة A إذا كانت v هو مقدار سرعة الكرة عند تلك النقطة ؟ لا تهمل قوة الجاذبية .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى القوة المؤثرة على الكرة عند النقطة A ؟

الإجابة : عند هذه النقطة تؤثر على الكرة قوتان فقط هما قوة الجاذبية mg إلى أسفل والشد فى الخيط T إلى أسفل أيضًا .

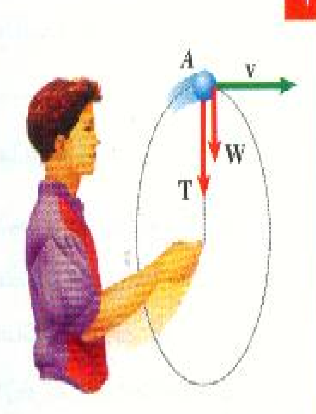
سؤال : ما هى عجلة الكرة عند النقطة A ؟

الإجابة : عندما تصل الكرة إلى النقطة A تكون الكرة متحركة فى دائرة نصف قطرها r ومقدار سرعتها v . والعجلة التى تصف هذه الحركة هى $a_c = v^2/r$. وعند النقطة A يكون مركز الدائرة إلى أسفل ، أى فى نفس اتجاه كلا القوتين .

سؤال : ما المعادلة التى تنتج عند تطبيق قانون نيوتن الثانى على هذا الموقف ؟

الإجابة : $F_{\text{net}} = mg + T = mv^2/r$. إذن :

$$T = \frac{mv^2}{r} - mg = m\left(\frac{v^2}{r} - g\right)$$



شكل 10-7 :
عندما تكون الكرة فى الموضع المبين سوف يسهم وزنها بجزء من القوة الجاذبة المركزية اللازمة .

الحل والمناقشة : لاحظ فى معادلة الشد السابقة أنه إذا كانت $v^2/r<g$ فإن الشد T يكون سالبًا ، وهذا مستحيل فيزيائيًا لأن الخيط يؤثر دائمًا على أى جسم مربوط فيه بقوة شد فقط ، ولكنه لا يمكن أن يؤثر عليه بقوة دفع أبدًا لأنه سوف يرتخى فى هذه الحالة . وعليه ، فإن مقدار سرعة الكرة عندما تصل إلى أعلى نقطة على المسار يجب أن يساوى $(gr)^{1/2}$ على الأقل حتى تستمر فى المسار الدائرى . أما إذا كانت v أقل من هذه القيمة فإن الكرة سوف تسقط إلى أسفل ، تاركة المسار الدائرى طبعًا .

تمرين : ماذا يجب أن تكون قيمة الشد فى الخيط عند قاع الدائرة إذا كانت الكرة تتحرك فى تلك النقطة بسرعة مقدارها v .

الإجابة : $T=mv^2/r+W=m(v^2/r+g)$.



لكى يستطيع الرامى تحريك المطرقة فى دائرة يجب عليه أن يكون قادرًا على التأثير على السلسلة بقوة جاذبة مركزية كافية . لاحظ كيف تمكنه زاوية ساقه وقدمه من تحقيق ذلك .

مثال 6-7 : ميل الطرق عند المنحنيات

منحنى فى طريق نصف قطره 60 m . هل يمكن إمالة سطح الطريق (بالنسبة للمستوى الأفقى) بحيث لا تحتاج سيارة متحركة بطول المنحنى بسرعة مقدارها 25 m/s إلى أى قوة احتكاك كى تعبر هذا المنحنى بأمان ؟ بأى زاوية يجب أن يميل الطريق ؟

1

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى القوة التى يمكنها توليد العجلة المركزية بدون احتكاك ؟

الإجابة: واضح من الشكل 11-7أ أن F_N ليست رأسية تمامًا ، بل أن لها مركبة أفقية اتجاهها نحو مركز المسار الدائرى للسيارة ؟

سؤال : فى أى الاتجاهات يجب تحليل القوة ؟

الإجابة: يوضح المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالسيارة (شكل 11-7ب) أن

F_N يجب تحليلها إلى مركبتين إحداهما أفقية والأخرى رأسية ، حيث θ زاوية ميل الطريق والسبب فى اختيار هذين الاتجاهين هو أن السيارة متحركة فى دائرة أفقية ، وعليه فإن عجلتها الجاذبة المركزية تكون فى الاتجاه الأفقي نحو مركز هذه الدائرة .

سؤال : على أى صورة يكون قانون نيوتن الثانى فى هذا الموقف ؟

الإجابة: بالنسبة للاتجاه الرأسى $a_y = 0$ ؛ وعليه :

$$mg = F_N \cos\theta$$

ومنه يمكن تعيين قيمة F_N . وفى الاتجاه الأفقى : $a_x = a_c = v^2/r$ ، إذن :

$$F_N \sin\theta = F_c = \frac{mv^2}{r}$$

سؤال : ما هو الشرط اللازم لتحديد الزاوية ؟

الإجابة: يمكن إيجاد الزاوية بحذف F_N من معادلتى المركبتين .

الحل والمناقشة : من المعادلة الأولى : $F_N = mg/(\cos\theta)$. بالتعويض عن F_N بهذه القيمة في المعادلة الثانية نحصل على :

$$\frac{mg\sin\theta}{\cos\theta} = mg\tan\theta = \frac{mv^2}{r}$$

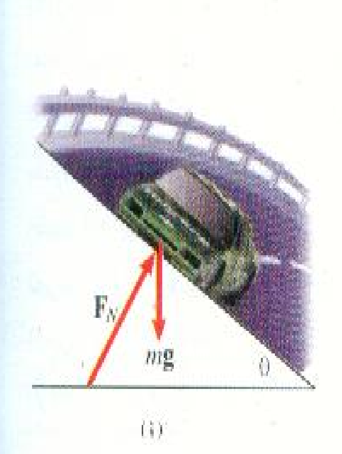
أو :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v^2}{gr}\right)$$

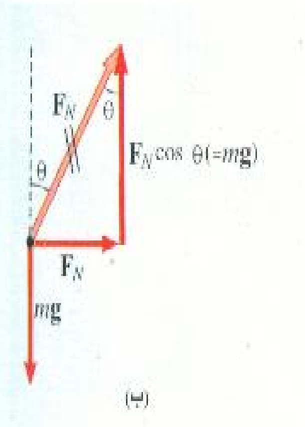
وبالتعويض عن قيمتى v ، r نجد أن :

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{(25\ \mathrm{m/s})^2}{(9.8\ \mathrm{m/s^2})(60\ \mathrm{m})}\right] = 47°$$

إذا لم يكن الاحتكاك موجودًا سوف تنزلق السيارة إلى أسفل الميل إذا كانت سرعتها أقل من 25 m/s وإلى أعلى الميل إذا كانت سرعتها أكبر من ذلك .



(أ)



(ب)

شكل 11-7 :
عندما يكون ميل الطريق صحيحًا تتعادل المركبة الرأسية للقوة العمودية مع mg ، وتولد المركبة الأفقية العجلة الجاذبة المركزية .

مثال 7-7 : ميل الطرق عند المنحنيات في وجود احتكاك

لنحاول الآن توسيع مناقشة المثال السابق فى حالة وجود احتكاك بين إطارات السيارة والطريق . أوجد مقدار أقصى سرعة يمكن أن تتحرك بها السيارة عند المنحنى لنفس زاوية ميل الطريق السابقة إذا كان معامل الاحتكاك الاستاتيكى بين إطارات السيارة والطريق 0.8 . هذا الموقف موضح بالشكل 12-7أ الذى يبين أن الاحتكاك متجه على استقامة سطحى التلامس . ويلاحظ أن اتجاه قوة الاحتكاك يعمل على مقاومة ميل السيارة إلى التزحلق خارج المنحنى .

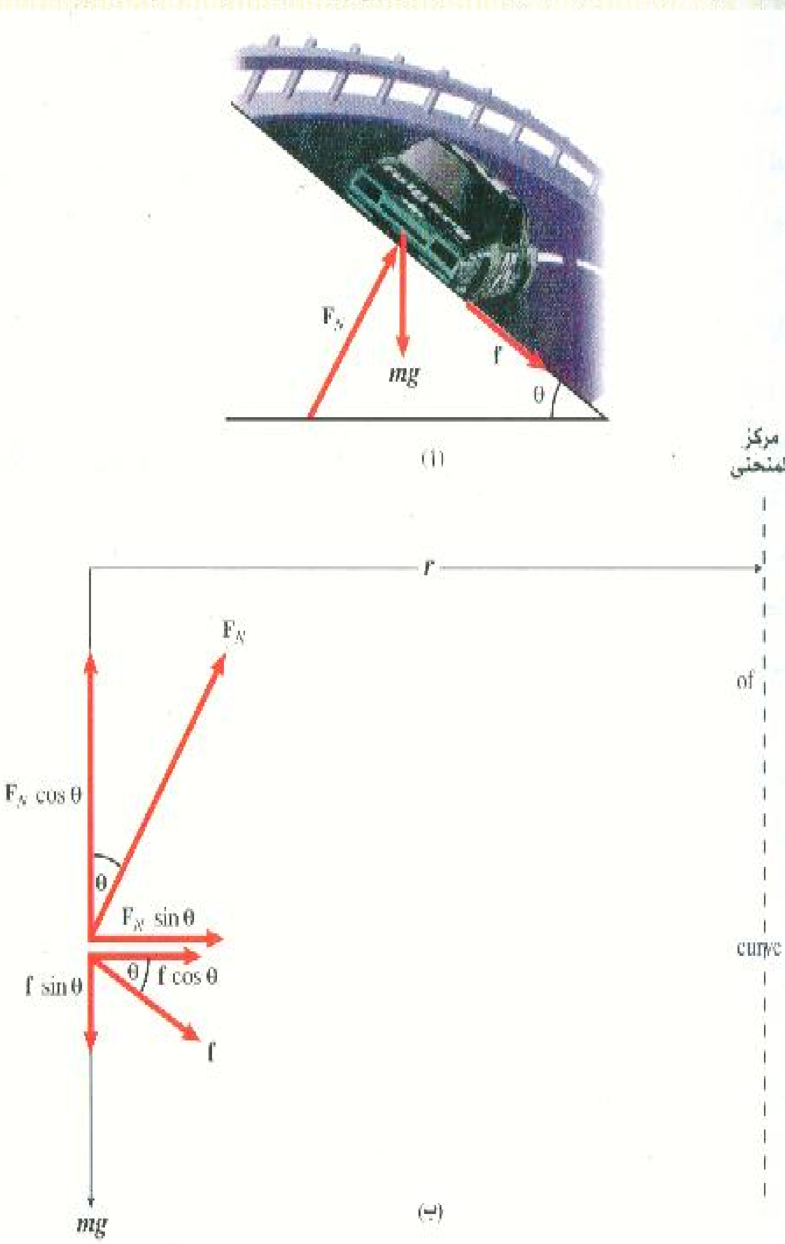
استدلال منطقى :

سؤال : ما وجه الاختلاف بين المخطط البيانى للجسم الحر الخاص بالسيارة فى هذه الحالة عن المثال السابق ؟

الإجابة : فى هذه الحالة تظهر قوة إضافة موازية لميل المنحنى هى قوة الاحتكاك ، وهذا مبين بالشكل 12-7ب .

سؤال : كيف تتغير مركبتا **f** فى هذا الموقف ؟

الإجابة : القوة **f** يكون لها مركبة أفقية ($f\cos\theta$) تضاف إلى المركبة الأفقية للقوة العمودية $\mathbf{F}_N$ مما يؤدى إلى زيادة القوة الجاذبة المركزية عنها فى الحالة السابقة . هذه القوة المضافة سوف تسمح للسيارة بالحركة فى المنحنى بسرعات أعلى . كذلك فإن المركبة الرأسية للقوة **f** ($f\sin\theta$) فيكون اتجاهها رأسى إلى أسفل ، وتضاف بالتالى إلى mg .



شكل 12-7 :
عند وجود احتكاك فى الطرق المنحنية فإنه يساهم بجزء معين فى $\mathbf{F}_c$.



الميل الكبير لمضمار سباق السيارات عند المنحنيات يمكن السيارات من الاحتفاظ بسرعات عالية عند الدوران .

سؤال : ما المعادلات التى نحصل عليها من تطبيق القانون الثانى ؟

الإجابة : مرة ثانية ، يجب أن تتزن القوى الرأسية :

$$F_N \cos\theta = mg + f\sin\theta$$

أما صافى القوة الرأسية فسوف يسبب عجلة جاذبة مركزية مقدارها :

$$F_N \sin\theta + f\cos\theta = \frac{mv^2}{R}$$

سؤال : ما الشرط الذى يتعين به مقدار السرعة **القصوى** المسموحة ؟

الإجابة : يتعين مقدار السرعة القصوى بالقيمة العظمى للعجلة الجاذبة المركزية . والقوة F_N لا يمكن أن تتغير ، ولكن f يمكنها أن تولد قوة تصل قيمتها العظمى إلى $\mu_s F_N$.

سؤال : ما المعادلة اللازمة لتعيين مقدار السرعة القصوى ؟

الإجابة : معادلتان :

$$F_N \sin\theta + \mu_s F_N \cos\theta = \frac{mv^2_{max}}{R}$$

و

$$F_N \cos\theta = mg + \mu_s F_N \sin\theta$$

الحل والمناقشة : من المعادلة الأخيرة يمكن تعيين F_N :

$$F_N = \frac{mg}{\cos\theta - \mu_s \sin\theta}$$

وبالتعويض عن F_N بهذه القيمة فى المعادلة الأولى ثم حلها بالنسبة إلى v_{max} نجد أن :

$$\frac{mg(\sin\theta + \mu_s \cos\theta)}{\cos\theta - \mu_s \sin\theta} = \frac{mv^2_{max}}{R}$$

لاحظ أن الكتلة قد اختصرت .

$$v^2_{max} = \frac{mR(\sin\theta + \mu_s \cos\theta)}{\cos\theta - \mu_s \sin\theta}$$

وبالتعويض بالقيم العددية في المثال السابق نحصل على :

$$v^2_{max} = \frac{(9.8)(60)(0.728 + 0.549)}{0.686 - 0.582} = 7240\ (m/s)^2$$

إذن :

$$v_{max} = 85\ m/s = 310\ km/h = 190\ mi/h$$

7-8 اعتقاد خاطئ شائع

كثيرًا ما يسارع بعض الناس إلى استنتاجات خاطئة تمامًا عند تفسير تجاربهم . فمثلاً ، قد يظن شخص جالس في وسط مقعد سيارته أنه قد تعرض لدفع إلى جانب السيارة عند انعطافها حول ناصية طريقين . وقد يؤكد هذا الشخص أن القوة التي دفعته جانبًا كانت كبيرة لدرجة أنها قذفته إلى جانب السيارة بشدة تكفي لإصابته . هذا بالطبع محض هراء ، فلا وجود لشبح خفي يدفعه تجاه السيارة . وبالتأكيد ليس هناك أي جسم مادي يمكن أن يقوم بدفعه في هذا الاتجاه . لابد إذن أن يكون هذا الشخص مخطئًا .

ولكن نفس الشخص لن يدعي أن قوة خفية قد أثرت عليه عند توقف السيارة فجأة دافعة إياه بشدة على لوحة أجهزة القياس . فهو يعلم أن كمية تحركه إلى الأمام يمكن أن تفقد فقط عندما تعوق حركته قوة ما . لذلك فعندما تقف السيارة فجأة فإنه يستمر في الحركة إلى الأمام حتى تبدأ لوحة أجهزة قياس السيارة في التأثير عليه بقوة معينة لإيقافه عن الحركة إلى الأمام . وهذا ليس إلا مثال لفكرة نيوتن عن أن الأشياء تستمر في الحركة إلى أن تؤثر عليها قوة تسبب إيقافها .

وبالمثل في حالة السيارة التي تنعطف حول ملتقى طريقين . فهنا يدفع الاحتكاك بين رصف الطريق والإطارات السيارة أفقيًا ويغير من حركتها في خط مستقيم . ويكون الوضع سيئًا للغاية بالنسبة لشخص جالس في منتصف المقعد حيث لا وجود لقوة الاحتكاك تقريبًا . ذلك أن قوة الاحتكاك بين المقعد وبنطلون هذا الشخص أصغر من أن تستطيع تغيير حركته في خط مستقيم . لذلك فإنه سوف يتزحلق في خط مستقيم إلى أن يصطدم بجانب السيارة الذي سيؤثر عليه عندئذ بقوة تسبب حركته في نفس المسار الذي تتبعه السيارة .

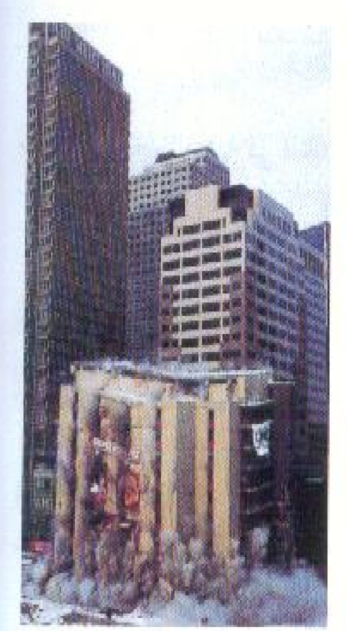
7-9 قانون نيوتن للجاذبية

تعتبر حركة الكواكب حول الشمس واحدة من أهم أمثلة الحركة في مسار شبه دائري ، وكانت هذه الحركة موضوع دراسات دقيقة مستفيضة للكثير من العلماء قبل أربعة قرون . فمن العام 1576 وحتى 1597قام الفلكي الدانمراكي تايكو براهي Tycho Brahe بجمع

تصنيف أدق وأشمل النتائج المرصدية لحركة الكواكب فى ذلك الحين على الإطلاق . وبناء على هذه النتائج استطاع يوهانز كبلر Johannes kepler وضع قوانينه الشهيرة عن الحركة الكوكبية خلال الأعوام 1609 – 1618 . هذه القوانين تبين أن المدارات الكوكبية دائرية تقريبًا ، وأن الزمن الذى يستغرقه الكوكب حول الشمس T يتناسب مع مكعب بعد الكوكب عن الشمس R :

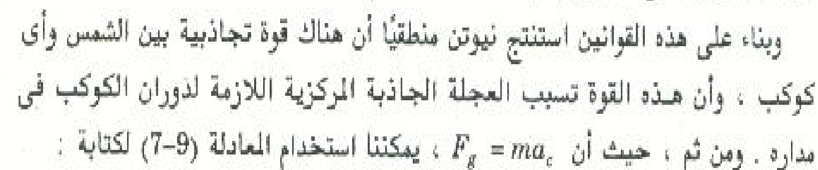
$$T^2 \propto R^3$$

وتعرف العلاقة السابقة بقانون كبلر الثالث .



تظهر قوة الجاذبية المؤثرة على المبنى بوضوح بمجرد أن تزول القوى الحاملة للمبنى .

وعندما بدأ نيوتن دراسته للقوى فى القرن السابع عشر كانت نتائج دراسات كبلر ومن سبقه عن الحركة الكوكبية متاحة له ، ولكن القانون الفيزيائى الموحد الذى يفسر سلوك الكواكب لم يكن بعد معروفًا . وبمجرد أن تبلورت قوانين نيوتن للحركة ، بما فى ذلك مفهوم القوة والعجلة الجاذبتين المركزيتين ، أصبح الطريق واضحًا أمام نيوتن لاكتشاف طبيعة قوة الجاذبية .



وبناء على هذه القوانين استنتج نيوتن منطقيًا أن هناك قوة تجاذبية بين الشمس وأى كوكب ، وأن هذه القوة تسبب العجلة الجاذبة المركزية اللازمة لدوران الكوكب فى مداره . ومن ثم ، حيث أن $F_g = ma_c$ ، يمكننا استخدام المعادلة (7-9) لكتابة :

$$F_g = \frac{m_p v^2}{R}$$

حيث m_p كتلة الكوكب . كذلك اهتدى نيوتن بالاستدلال المنطقى أن الزمن المدارى أو الدورة T يكون :

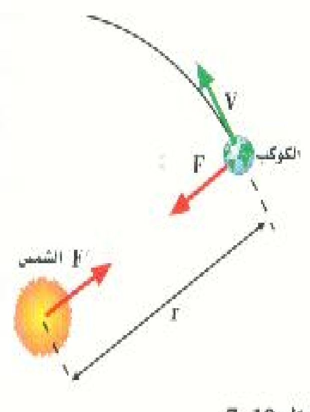
$$T = \frac{2\pi R}{v} \qquad \text{ومنه} \qquad v \propto \frac{R}{T}$$

وبتربيع هذه العلاقة واستخدام قانون كبلر الثالث نحصل على :

$$v^2 \propto \frac{R^2}{R^3} \propto \frac{1}{R}$$

وبتجميع كل هذه العلاقات استنتج نيوتن أن القوة التى تؤثر بها الشمس على الكوكب يجب أن تكون على الصورة :

$$F_g \propto \frac{m_p}{R^2}$$



شكل 13-7:
تتجاذب الشمس والكوكب أحدهما مع الآخر بقوتين متساويتين فى المقدار .

وباستخدام قانونه الثالث تحقق نيوتن أن الكوكب يؤثر على الشمس بقوة مساوية (شكل 13-7) . هذا التماثل يعنى أن القوة يجب أن تعتمد على كلتا الكتلتين بنفس الطريقة ، أى أن القوة يجب أن تكون على الصورة :

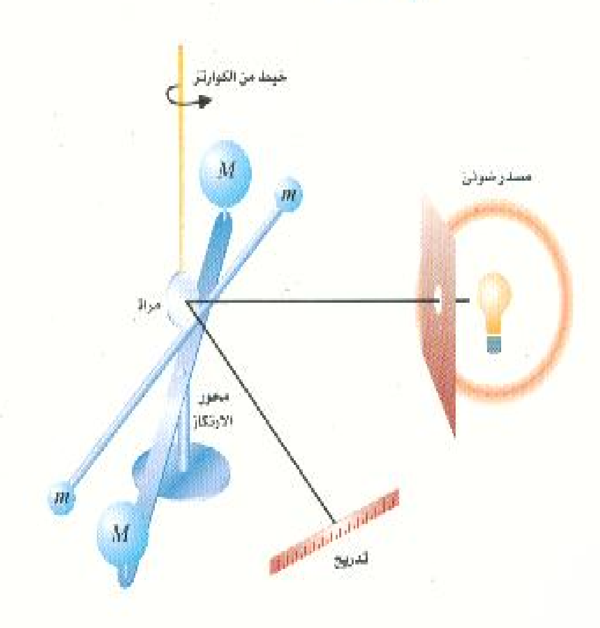
$$F_g \propto \frac{m_s m_p}{R^2}$$

حيث m_s كتلة الشمس .

كذلك افترض نيوتن أن نفس قوة الجاذبية التى تسبب تسارع القمر نحو الأرض (العجلة الجاذبة المركزية) تسبب أيضًا سقوط الأجسام (كالتفاحة الأسطورية فى بستانه) تجاه الأرض بالعجلة g . ولاقتناعه أن قوة الجاذبية قوة كونية أساسية قام نيوتن بتعميم الأمثلة السابقة فى قانونه العام للجاذبية :

إذا كانت المسافة بين مركزى كرتين منتظمتين كتلتاهما m_1 و m_2 هى r فإن كلاً من الكرتين تجذب الأخرى بقوة مقدارها :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (7\text{-}11)$$



شكل 14-7:
رسم تخطيطى لميزان كافنديش . لاحظ كيف يستخدم الشعاع الضوئى لكشف التواء الخيط .

من الجدير بالذكر أن قيمة ثابت الجاذبية G لا يمكن تعيينها نظريًا ؛ ولكن يمكن تعينها بالتجربة فقط . وقد كان هنرى كافنديش Henry Cavendish أول من قام بإيجاد قيمته عام 1798 مستخدمًا جهازًا يسمى ميزان كافنديش (شكل 14-7) . الكتلتان الصغيرتان المتماثلتان m فى ميزان كافنديش معلقتان فى خيط رفيع دقيق جدًا من الكوارتز . عند تحريكُ الكتلتين الكبيرتين M بحيث تقتربان من الكتلتين الصغيرتين m سوف يسبب التجاذب بين M و m التواء الخيط . وبمعايرة الجهاز بحيث تعرف القوة اللازمة لحدوث التواء معين يمكن حساب قوة التجاذب بين m و M مباشرة من قيمة التواء الخيط المقاسة . وحيث أن F ، r ، M ، m معلومة جميعها ، يمكن إذن التعويض عن قيمتها فى المعادلة (7-11) ثم حلها بالنسبة إلى المجهول الوحيد G . وطبقًا لأدق القياسات المتاحة فى الوقت الحاضر فإن القيمة المقبولة حاليًا لثابت الجاذبية G هى :

$$G = 6.672 \times 10^{-11}\ \text{N.m}^2/\text{kg}^2$$

مثال توضيحى 7-4

علقت كرتان منتظمتان كتلة كل منهما 70.0 kg كبندولين بحيث كانت المسافة الفاصلة

بين مركزيهما 2.00 mm . أوجد قوة التجاذب التثاقلي بينهما وقارنها بوزن كل من الكرتين .

استدلال منطقي :

تعطى قوة التجاذب التثاقلي بالمعادلة (11-7) :

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

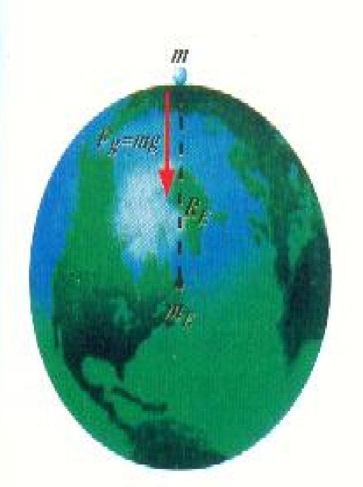
$$= \frac{(6.67\times10^{-11}\,\mathrm{N.m^2/kg^2})(70.0\,\mathrm{kg})(70.0\,\mathrm{kg})}{(2.00\,\mathrm{m})^2}$$

$$= 8.17\times10^{-8}\,\mathrm{N}$$

وزن كل من الكرتين هو $mg = (70\,\mathrm{kg})(9.8\,\mathrm{m/s^2}) = 686\,\mathrm{N}$. وعليه فإن النسبة بين قوة التجاذب التثاقلي التي تؤثر بها كل كرة على الأخرى ووزن أى منهما هى :

$$\frac{F_g}{W} = \frac{8.17\times10^{-8}}{686} = 1.19\times10^{-10}$$

معنى ذلك أن قوى التجاذب التثاقلي على مستوى حياتنا اليومية تكون محسوسة فقط عندما تكون إحدى الكتل المتفاعلة على الأقل كتلة « فلكية » ■ .



شكل 15-7 :
قوة الجاذبية المؤثرة على كتلة قدرها m على سطح الأرض .

وهكذا فإن كتلة الأرض تجذب كل جسم عليها . وقد قمنا مرات عديدة بحساب قوة هذا التجاذب ممثلة بكمية mg التى أطلقنا عليها وزن الجسم . هذا الحساب مبنى على أساس عجلة السقوط الحر الناتجة عن الجاذبية الأرضية بالقرب من سطح الأرض . ولكننا سنقوم الآن بتفسير عجلة السقوط الحر g باستخدام قانون الجاذبية العام .

يمثل الشكل 15-7 كتلة صغيرة كتلتها m على سطح الأرض أو بالقرب منه . وبفرض أن الأرض كرة منتظمة يمكننا اعتبار أن مركز كتلة الأرض يقع فى مركزها الهندسى . وهكذا يمكننا اعتبار أن المسافة بين m و m_E (كتلة الأرض) اللازم استخدامها فى المعادلة (11-7) هى نصف قطر الأرض R_E فى الشكل 15-7 . وباستخدام قانون الجاذبية سوف نجد إذن أن القوة التى تؤثر بها الأرض على الكتلة m هى :

$$F_g = \frac{Gmm_E}{R_E^2}$$

وعند مقارنة هذه المعادلة بوزن الجسم mg سوف نرى أى الكميات الفيزيائية هى التى تحدد بشكل أساسى قيمة g :

$$F_g = \frac{Gmm_E}{R_E^2} = \text{الوزن} = mg$$

إذن :

$$g = \frac{Gm_E}{R_E^2} \qquad (7-12أ)$$

لاحظ أن الكتلة m قد اختصرت ، وهذا يعنى أن قيمة g واحدة لجميع الأجسام الواقعة على سطح الأرض .

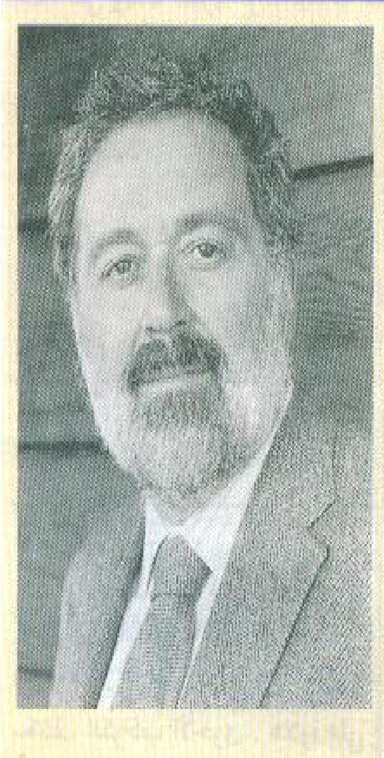
أوضحنا فى القسم 3–6 أن وزن جسم كتلته m يعتمد على موضعه على سطح الأرض . ويلاحظ من المعادلة (12–7أ) أن g ، والوزن بالتالى ، يعتمد على بعد الجسم عن مركز الأرض . وحيث أن الأرض ناتئة قليلاً عند خط الاستواء فإن هناك اختلافات صغيرة فى عجلة الجاذبية g ، والوزن أيضًا ، من مكان إلى آخر على سطح الأرض . (إضافة إلى ذلك يؤدى دوران الأرض إلى أن يكون الوزن الظاهرى لأى جسم أقل من قيمته عند خط الاستواء منه عند القطبين) .

يمكن بسهولة تعميم المعادلة (1–7أ) لإيجاد عجلة الجاذبية على سطح أى كوكب عندما تكون كتلته m_p ونصف قطره R_p معلومين :

$$g_p = \frac{Gm_p}{R_p^2} \qquad (7-12ب)$$

تمرين : باستخدام قيمة G المعطاة سابقًا ، وإذا علمت أن $m_E = 6.0 \times 10^{24}$ kg و $R_E = 6400$ km . أثبت أن قيمة g الناتجة باستعمال المعادلة (12–7أ) تساوى $9.8\ m/s^2$.

الفيزيائيون يعملون روبرت هـ. مارش جامعة وسكونس ، ماديسون



بدأ اهتمامى بالفيزياء فى سنوات المراهقة حين كنت أعمل كجليس لأطفال أحد الجيران وكان فيزيائيًا . هذا الجار كان يستمتع بعمله كما بدا لى أكثر من معظم من أعرفهم من الكبار ، كما أنى وجدت مكتبته مذهلة حقيقة . وكان أهم ما حفزنى فيه حبه الشديد للإطلاع وقد أمضيت ما يقرب من 25 عاما فى دراسة الجسيمات دون الذرية ، ولكن بحلول حام 1980 تبين لى أننا على ما يبدو مازلنا فى بدايات فهم هذا الموضوع ، وكان هذا أقل من طموحاتى . ولذلك انتقلت إلى مجال الفيزياء الفلكية .

وحاليا يتوجه اهتمامى إلى البحث عن منشأ الأشعة الكونية ، وهى دقائق وأنوية ذرية تضرب الأرض باستمرار من الفضاء الخارجى . هذه الأشعة تخلق تقريبًا نصف الخلفية الإشعاعية فى بيئتنا الخارجية . وبالرغم من أن اكتشاف الأشعة الكونية يرجع إلى ما يقرب من قرن مضى فإننا مازلنا لا نعلم من أين تأتى . ذلك أن مجرة درب اللبانة مليئة بالمجالات المغناطيسية الضعيفة التى تسبب انحراف الجسيمات المشحونة كهربائيًا عن المسار الخطى المستقيم بحيث لا يمكن تقصى مسارها الفعلى إلى مصدرها .

والأشعة الكونية لها طاقة عالية جدًا بحيث لا يحتمل أن تأتى من نجوم عادية كشمسنا ، ونحن نعتقد أنها تنشأ فى بضع أماكن من الكون حيث توجد قوة هائلة جدًا تسبب تسارعها ، كجاذبية الثقوب السوداء أو القوى الكهرومغناطيسية بالقرب من نجم نابض يتحرك حركة مغزلية سريعة جدًا . (النجم النابض هو « نجم نيوترونى » على هيئة نواة ذرية عملاقة كتلتها أكبر من كتلة الشمس مرة ونصف ولكنها منضغطة فى صورة كرة قطرها بضعة أميال . وتتميز بعض النجوم النابضة بمجالات مغناطيسية فى غاية الشدة) .

وبالرغم من أن الجسيمات المشحونة لا يمكن تقصيها إلى مصدرها فإن هذا ممكن فى حالة الجسيمات المتعادلة . وفى الوقت الحالى فإننى أساعد فى بناء مكشاف **النيوترينوات** ، وهى من أقرباء الإلكترون ولكنها متعادلة كهربائيًا . هذه الجسيمات تتفاعل مع المادة تفاعلاً ضعيفاً جدًا بحيث يمكنها أن تخترق الأرض فى خط مستقيم دون أن تترك لها أثرًا فى مسارها . ولكى يكون هناك أمل فى كشف هذه الجسيمات من الضرورى مراقبة كمية هائلة جدًا من المادة . وحتى فى هذه الحالة لن يمكنك أن تكشف إلا عن نسبة صغيرة فقط مما يخترق الأرض منها . هذا المكشاف لا يمكن أن يكون على سطح الأرض وإلا أغرقه إشعاع الأشعة الكونية كالطوفان . ولهذا السبب فإننا نقوم ببناء جهاز يسمى DUMAND* فوق قاع المحيط وعلى عمق ثلاثة أميال تحت سطح الماء فى هاواى . والميونات هى الأقرباء المشحونة للنيوترينوات ، وهى تشبه الإلكترونات ولكنها أثقل منها مائتى مرة .

يتكون DUMAND من 216 مكشافاً ضوئيًا فائق الحساسية تراقب حوالى مليون طن من ماء البحر ، وهو حجم أكبر كثيرًا من برج سيرز . ذلك أنه عندما تتفاعل النيوترينوات مع الأنوية يتحول بعضها إلى ميونات تشع وميضًا أزرق باهتًا عند مرورها خلال الماء . وعندئذ تلتقط المكشافات الضوئية هذه الإشارة وتغذى بها أجهزة كومبيوتر على الشاطئ ، وهذه تقوم بدورها بإعادة مسار الميون وهو قريب جدًا من مسار والده ـ النيوترينو .

ومما يبهرنى فى هذا المشروع أنه مشروع عالمى هام للعديد من التخصصات فى نفس الوقت . ففريق DUMAND يضم علماء فى مجال الفيزياء والمحيطات من اليابان وألمانيا وسويسرا وكذلك أمريكا ، بل أننا توصلنا إلى اكتشاف هام فى مجال بيولوجيا البحار ، وهو أن الكائنات الدقيقة المشعة للضوء فى أعماق المحط ينبعث منها الضوء فقط عند حفزها بحركة بعض الأجسام القريبة .

إن DUMAND سوف يفتح نافذة جديدة على الكون . ومثلما حدث ذلك سابقًا ـ فى كل مرة تقريبا ـ فى مجال الدراسات الفلكية فى المنطقة اللاسلكية وتحت الحمراء وفوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة جاما ـ كانت معظم الاكتشافات الهامة مفاجآت تامة لنا . وإن أملى كبير أن يكون حظنا سعيدًا فى مجالنا كحظ من سبقنا ؛ ذلك أن المجهول وغير المتوقع هو الذى يدفع العلم حقيقة إلى الأمام .

7-10 الحركة المدارية

ربما كانت أكثر أمثلة الحركة الدورانية عظمة ومهابة موجودة فى السماوات العلى . فالأرض وغيرها من الكواكب تتحرك حول الشمس فى مسارات دائرية تقريبًا ، وكذلك يتحرك قمر كوكب الأرض حولها فى مسار دائرى تقريبًا ، وهذا ينطبق أيضًا على أقمار مختلف الكواكب الأخرى . علاوة على ذلك فإن الكواكب التى اخترعها الإنسان نفسه ـ

* الحروف الأولى من Deep Underwater Muon And Neutrino Detector ، مكشاف الميونات والنيوترينوات تحت الماء العميق .

إن الأقمار الصناعية - تتحرك في مدارها بسرعات دائرية تقريبا حول الأرض . نفترض الآن هذا النوع من الحركة وأمثالها يسمى بالحركة الدائرية .

يمثل الشكل ٧-١٦ القمر الأرضي أو أي تابع آخر أثناء دورانه حول الأرض في مدار دائري : ولنفترض أن كتلة التابع m_s وسرعته v وأن نصف قطر المدار r وكتلة الأرض m_E . وكما نعلم من مناقشتنا السابقة فإن مقدار القوة الجاذبة المركزية اللازمة لحفظ التابع في مداره هي $m_s v^2/r$. وهذه القوة تنشأ طبيعيا نتيجة قوة الجذب التثاقلي التي تؤثر بها الأرض على التابع :

$$\text{قوة الجذب التثاقلي} = G\frac{m_s m_E}{r^2}$$

وبتطبيق قانون نيوتن الثاني على هذه الحركة الدورانية نحصل على :

$$G\frac{m_s m_E}{r^2} = \frac{m_s v^2}{r} \qquad (7\text{-}13)$$

من الضروري ملاحظة أن كتلة التابع m_s قد اختصرت في هذه العلاقة ، وسنستنتج من ذلك إذن أن مدار التابع لا يعتمد على كتلته . ومعنى ذلك أن القمر وكرة البيسبول سوف يتحركان بنفس الكيفية تماما إذا تساوت قيمة كل من سرعتهما المدارية v ونصف قطر المدار r . وبناء على ذلك فإن مقدار سرعة أي تابع في مداره نصف قطره r لابد أن تحقق العلاقة (7-13) :

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}} \qquad (7\text{-}14)$$

شكل ٧-١٦ :
القوة الجاذبة المركزية اللازمة للمحافظة على التابع تنشأ نتيجة التجاذب التثاقلي مع الأرض .



القوة الجاذبة المركزية على رائد الفضاء والسفينة الفضائية هي قوة الجاذبية [illegible]

كما أن دورة التابع فى المدار الدائرى تعطى بالعلاقة $T = 2\pi r / v$. وبالتعويض عن v من المعادلة (14–7) فى معادلة الدورة T ثم تربيع النتيجة نجد أن :

$$T^2 = \left(\frac{2\pi r}{v}\right)^2 = \left(\frac{4\pi^2}{Gm_E}\right) r^3 = \text{ثابت} \times r^3 \qquad (7\text{-}15)$$

وهذا يتفق مع قانون كبلر الثالث .

مثال 8-7

بفرض أن مدار الأرض حول الشمس مدار دائرى (الواقع إنه إهليجى « بيضاوى » إلى حد ما) نصف قطره 1.5×10^{11} m ، أوجد كتلة الشمس .

استدلال منطقى :

سؤال : ما المبدأ الذى يربط بُعد الأرض عن الشمس بكتلة الشمس ؟

الإجابة : تآلف قانون الجاذبية الذى يعطى مقدار القوة المؤثرة على الأرض مع تطبيق قانون نيوتن الثانى على الحركة الدائرية الذى يربط هذه القوة بالعجلة الطاردة المركزية المؤثرة على الأرض فى مدارها .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها بهذه الطريقة ؟

الإجابة : يمكن كتابة قوة الجاذبية التى تؤثر بها الشمس (وكتلتها m_s) على الأرض (وكتلتها m_E) على الصورة $F_g = Gm_E m_s / r^2$ ، حيث r المسافة بين الأرض والشمس . ويكون اتجاه هذه القوة تجاه مركز الدائرة التى يفترض أن الأرض تتحرك عليها . وهكذا يمكننا اعتبار أن هذه القوة هى القوة الجاذبة المركزية التى تولد العجلة الجاذبة المركزية للأرض :

$$F_c = F_g = \frac{Gm_E\, m_s}{r^2} = \frac{m_E\, v^2}{r}$$

سؤال : كيف يمكن إيجاد v ؟

الإجابة : من طول السنة الأرضية ، وهو دورة مدار الأرض .

$$T = 365.25 \text{ days} \qquad \text{حيث} \qquad v = \frac{2\pi r}{T}$$

وبمعلومية v تصبح m_s المجهول الوحيد .

الحل والمناقشة : يحول T إلى ثوان كما يلى :

$$T = (365.25 \text{ days}) \left(\frac{24.0 \text{ h}}{1 \text{ day}}\right)\left(\frac{3600 \text{ s}}{1.00 \text{ h}}\right)$$

$$= 3.16 \times 10^7 \text{ s}$$

إذن :

$$v = \frac{2\pi(1.50\times10^{11} m)}{3.16\times10^{7}\ s} = 2.89\times10^{4}\ m/s$$

وهذه تساوى 67,000 mi/h! تقريبًا .

وباستخدام هذه الطريقة يمكن إيجاد كتلة الشمس :

$$m_s = v^2 r/G$$

$$= \frac{(2.98\times10^{2}\ m/s)^2(1.5\times10^{11}\ m)}{6.67\times10^{-11}\ N.m^2/kg^2} = 2.00\times10^{30}\ kg$$

مثال 9 - 7

ترسل إشارات الراديو والتلفزيون من قارة إلى قارة « بالارتداد » على **توابع تزامنية أرضية** . هذه التوابع تدور حول الأرض مرة كل 24 h ، وهكذا فعندما يدور التابع تجاه الشرق فوق خط الاستواء فإنه يبقى دائمًا فوق نفس النقطة على الأرض لأن الأرض ذاتها تدور بنفس هذا المعدل ، كما أن أقمار التنبؤ الجوى تصمم أيضًا بحيث تحوم حول الأرض بنفس هذه الطريقة . (أ) ما قيمة نصف قطر مدار التابع التزامنى الأرضى ؟ وما مقدار سرعته ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى المعطيات والمجاهيل فى هذه المسألة ؟

الإجابة: دورة التابع التزامنى الأرضى معلومة وهى 24 h = 86,400 s . كذلك يمكننا افتراض أن G وكتلة الأرض معلومتان .

سؤال : هل توجد علاقة مباشرة بين T ونصف قطر المدار ؟

الإجابة: نعم ، وهذا هو قانون كبلر الثالث الذى قمنا باشتقاقه فى القسم السابق .

الحل والمناقشة : باستعمال المعادلة (7-15) بعد إعادة ترتيبها نجد أن :

$$r^3 = \frac{Gm_E}{4\pi^2}T^2$$

$$= \frac{(6.67\times10^{-11}\ N.m^2/kg^2)(5.98\times10^{24}\ kg)}{4\pi^2}\times(8.64\times10^{4}s)^2$$

$$= 7.52\times10^{22}\ m^3$$

وعليه فإن نصف قطر المدار (الجزء أ) هو :

$$r = 4.22\times10^{7}\ m = 26,200\ mi$$

مقاسًا من مركز الأرض . أما مقدار السرعة المدارية فيكون :

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi(4.22\times10^{7}\ m)}{8.64\times10^{4}\ s} = 3070\ m/s$$

تمرين : عين الدورة ومقدار السرعة المدارية لتابع « منخفض المدار » ، وهو تابع نصف قطر مداره يساوى أساسًا نصف قطر الأرض .

الإجابة : $T = 5060\ s = 84.3$ min ، $v = 7910$ m/s = 17,700 mi/h .

7-11 الوزن الظاهرى وانعدام الوزن

كثيرًا ما نسمع أن الأجسام تبدو عديمة الوزن فى سفينة فضائية تدور حول الأرض أو متحركة فى طريقها إلى نقطة بعيدة فى الفضاء . لنتفحص هذه الظاهرة بالتفصيل ، ولكن علينا أولاً أن نذكر تعريفنا للوزن مرة ثانية . يعرف الوزن بأنه قوة شد الجاذبية الأرضية للجسم . ووزن الجسم على الأرض هو قوة الجذب التثاقلى للأرض على الجسم . وبالمثل فإن وزن جسم على القمر هو قوة الجذب التثاقلى التى يؤثر بها القمر على الجسم .

يقاس وزن أى جسم عادة بوضعه على كفة ميزان ساكن فى أغلب الأحيان . وفى هذه الحالة يؤثر الميزان على الجسم بقوة حاملة تساوى قوة الجاذبية ، أى أن ما يقاس هو فى الواقع قيمة هذه القوة الحاملة . فمثلاً ، عندما ترفع جسمًا فى يدك لتقدير وزنه فإنك تحاول فى الحقيقة أن تقدر مقدار القوة التى يجب عليك بذلها حتى تحمل هذا الجسم .

وكما سنرى حالاً فإن القوة اللازم بذلها لحمل الجسم تساوى قوة الجاذبية عندما **لا يكون الجسم متسارعًا فقط** . ومن ثم يجب علينا الاحتفاظ بمصطلح **الوزن الظاهرى** بالنسبة لقراءة الميزان وغير ذلك من طرق قياس القوة الحاملة للجسم .

لإيضاح هذه النقطة سوف نقوم بدراسة الوزن الظاهرى لجسم كتلته m فى مصعد . إذا كان المصعد المبين بالشكل 17-7أ ساكنًا فإن قانون نيوتن الثانى يخبرنا أن القوة المحصلة المؤثرة على الجسم تساوى صفرًا ؛ لأن العجلة تساوى صفرًا . وإذا رمزنا لقوة الجذب التثاقلى المؤثرة على الجسم (أى وزنه) بالحرف W وللشد فى الخيط الذى يحمل الجسم بالحرف T فإن :

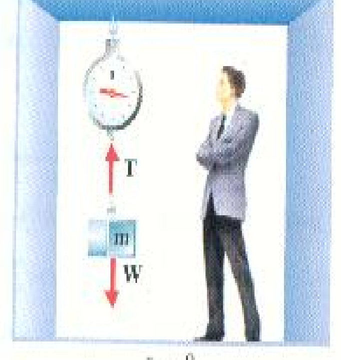
$$T = W \quad \text{أو} \quad T - W = 0$$

وذلك عندما تكون $a = 0$. وفى هذه الحالة يتساوى كل من الشد فى الخيط ، وهو T ، والوزن الظاهرى (قراءة الميزان) مع الوزن الحقيقى للجسم W .

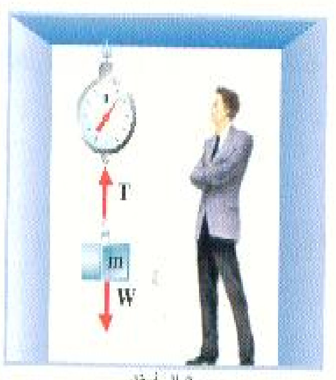
هذا الموقف يظل سائدًا طالما كانت $a = 0$ ، وتحت هذه الشروط سيكون $T = W$ ويتساوى الوزن الظاهرى مع الوزن الحقيقى للجسم . وحتى إذا كان المصعد متحركًا إلى أعلى أو إلى أسفل بسرعة ثابتة المقدار فإن العجلة ستظل صفرًا ويكون الوزن الظاهرى مساويًا للوزن الحقيقى أيضًا .

لنفحص الآن الموقف المبين بالشكل 17-7ب عندما يكون المصعد متسارعًا إلى أسفل . عند تطبيق قانون نيوتن الثانى كما سبق نجد أن :

$$W - T = ma$$



$a = 0$
$T = W$
(أ)



a إلى أسفل
$W - T = ma$
$T = W - ma$
(ب)

شكل 17-7 :
يظهر وزن جسم فى مصعد مختلفًا بالنسبة لمشاهد موجود فى نفس المصعد ، ويعتمد ذلك على عجلة المصعد .

ومنه :

$$T = W - ma$$

لاحظ أن الشد فى الخيط ، وقراءة الميزان بالتالى ، أقل من W بمقدار ma ، وعندئذ سوف يبدو أن وزن الجسم بالنسبة لشاهد موجود فى المصعد المتسارع أقل من W . ويكون الوزن الظاهرى للجسم فى هذه الحالة $W - ma$.

ويحدث أكثر المواقف إثارة وغرابة عندما يسقط الجسم سقوطًا ذاتيًا ـ أى عندما تتساوى عجلة المصعد مع عجلة الجاذبية الأرضية ؛ $a = g$. وحيث أن $W - ma$ وأن $a = g$ فى حالة السقوط الحر ، فإن الشد فى الخيط :

$$T = W - ma$$

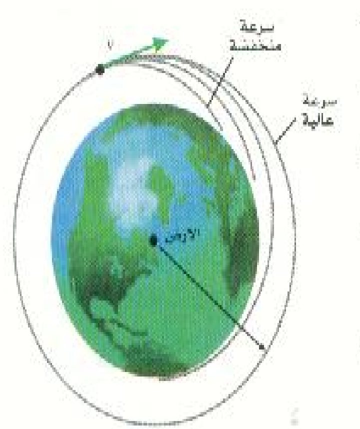
سوف يصبح :

$$T = mg - mg = 0$$

هذا يعنى أن الجسم يبدو عديم الوزن فى مصعد ساقط سقوطًا حرًا ! وإذا ما فكرنا فى ذلك قليلاً سوف يتضح لنا أن هذا ليس غريبًا على الإطلاق . فحيث أن المصعد وكل ما بداخله يتسارع بنفس عجلة السقوط الحر ، يمكننا أن نرى من تعريف السقوط الحر نفسه أنه لا توجد أى قوى حاملة للأجسام (المصعد وكل شىء بداخله) أو أى قوى تعوق السقوط الحر بأى صورة من الصور . وعليه فإن جميع القوى الحاملة المؤثرة على المصعد وكل شىء بداخله لابد أن تساوى صفرًا . ولهذا يجب أن يكون الشد فى الحبل الذى يحمل الجسم صفرًا . ونتيجة لذلك تبدو جميع الأجسام الموجود داخل المصعد عديمة الوزن .

تمرين : أثبت أن الوزن الظاهرى فى مصعد متحرك إلى أعلى بعجلة مقدارها a يجب أن يكون أكبر من الوزن الحقيقى : $T = W + ma$.

يتضح لنا من هذه الاعتبارات أن **الوزن الظاهرى للأجسام فى الأنظمة المتسارعة لا يساوى وزنها الحقيقى بالضرورة** . وعلى وجه الخصوص ، إذا كان النظام ساقطًا سقوطًا حرًا* فإن جميع القوى الحاملة يجب أن تكون صفرًا وعندئذ تبدو جميع الأجسام عديمة الوزن . هذا يعنى أنه طالما كانت السفينة الفضائية ساقطة سقوطًا حرًا فى الفضاء ، أى عندما تتوقف محركاتها الصاروخية عن العمل ؛ فإن أى شىء داخل هذا النظام الساقط سقوطًا حرًا سوف يبدو عديم الوزن . وهذا لا يتوقف على مكان وجود الجسم داخل النظام أو على ما إذا كان النظام ساقطًا تحت تأثير قوة جذب الأرض أو الشمس أو أى نجم بعيد ؛ فطالما كان السقوط حرًا فإن كل شىء يبدو عديم الوزن .



شكل 18-7 :
إذا أطلق جسم بسرعة عالية بدرجة كافية فى اتجاه مماسى للأرض فإنه سوف يدور حولها . (ربما كان نيوتن أول من أدرك هذه الحقيقة) .

والتابع الفضائى الذى يدور حول الأرض مجرد مثال لجسم ساقط سقوطًا ذاتيًا . وقد تدهشك هذه العبارة فى البداية ، ولكن من السهل إثباتها . لنتأمل سلوك مقذوف منطلق

---

* تذكر أن الجسم الساقط سقوطًا حرًا هو ذلك الجسم الواقع تحت تأثير نوع واحد من القوى الخارجية غير المتزنة هو قوة الجاذبية .

فى اتجاه مواز لسطح الأرض فى غياب الاحتكاك الـهوائى . (عند ارتفاعات الأقمار الصناعية يكون الـهواء رقيقًا جدًا بحيث يمكن إهماله) ، وهـذا الموقف مبين بـالشكل 7-18 . وتمثل المسارات المختلفة مسارات مقذوف ينطلق مماسيًا لسطح الأرض . ويلاحظ من هذا الشكل أن انحناء مسار المقذوف أثناء السقوط الحر يقل مع زيادة السرعة الأفقية . وإذا ما أطلق المقذوف بسرعة كافية فى اتجاه مواز لسطح الأرض ، فإن انحناء المسار سوف يتطابق مع انحناء الأرض كما هو مبين . وفى هذه الحالة سوف يدور المقـذوف (التـابع مثلاً) ببساطة حول الأرض . وحيث أن المقـذوف يـدور حـور الأرض فإنـه يكـون دائمًا متسارعًا نحو مركز الأرض ، وتكون عجلته فى اتجاه نصف قطـر المسـار g ، أى عجلـة السقوط الحر . وهذا يعنى فى الواقع أن التابع يكون ساقطًا تجاه مركـز الأرض فـى كـل لحظة ، ولكن انحناء الأرض يمنعه من التصـادم مـع سطحها . وحيـث أن التـابع فـى حالة سقوط حر فإن كل ما يوجد بداخله يسقط أيضًا سقوطًا حـرًا ، وبذلـك تبـدو كلـها عديمة الوزن .

7-12 وجهة نظر حديثة : التفاعل بين الجاذبية والضوء

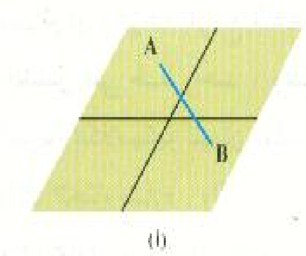
تركزت دراستنا للميكانيكا حتـى الآن علـى فـهم كيفيـة حركـة الأجسام أو اتزانـها تحت تأثير القوى . ويصف قانون الجاذبية العام الذى تناولناه بالمناقشة فى هذا الفصـل قوة تجاذبية أساسية بين كتلتين . وتعرفنا فى هذا الفصل أيضًا على تأثير الجاذبية فـى تحديد المدارات الدائرية للكواكب والتوابع الأرضية وعلـى دورهـا فـى تعجيـل الأجسـام الساقطة بالقرب من سـطح الأرض . لكننـا حتـى الآن لم نذكـر شيئًا عـن إحـدى الظواهر اليومية وهى المتعلقة بحركة الضوء . وبـالرغم مـن أن للضوء طاقـة وكميـة تحـرك فإنـه لا يحتوى علـى مـادة وليس لـه كتلة ، وهـذا مـا سوف يناقش فى فصول لاحقة . والسؤال الآن هو هل تستطيع قوة الجاذبية التأثير على حركة شىء لا يتكون من المادة ؟ ليس فى نظرية نيوتن ما ينبئ عن مثل هذا التأثير .

من أهم المشاهدات العامة أن الضـوء يسير فـى خطـوط مستقيمة . والحقيقـة أننـا نستخدم هذه الخاصية فى تعريف الخطوط المستقيمة فـى الأعمـال المسـاحية وقيـاس المسـافات . كذلك يشار إلى « أشعة » الضوء على أنها تصف اتجاه حركة الضـوء . مـن المعلوم أيضًا أن الشعاع الضوئى يمكن أن « ينثنى » أو ينكسـر عنـد انتقالـه مـن مـادة شفافة إلى أخرى ؛ عندما يدخل الضوء من الـهواء إلى الزجاج أو الماء مـن الـهواء مثلاً . ولكن الضوء لا ينحرف أبدًا عن المسار الخطى المستقيم عند انتقاله فى الفضاء أو حتـى فى الـهواء عندما يكون ضغطه ودرجة حرارته منتظمتين . فمثلاً لا يلاحـظ إطلاقـًا أن الحزمة الضوئية الموازية للأرض تتخذ مسارًا منحنيًـا كمسـار المقـذوف . يبـدو إذن أن الضوء لا يتأثر بالجاذبية الأرضية .

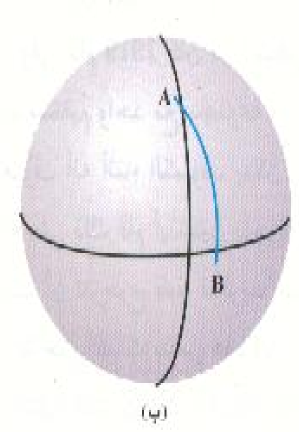
الخاصية الثانية للضوء هى أنه يتحرك فى الفضاء بنفس السرعة وهى 3×10^8 m/s ، وسوف تناقش طرق قياس هذه السرعة الفائقة فى فصول لاحقة . وهكذا يبدو أن خبرتنا تؤكد أن الضوء لا يعانى أى تسارع ، وأن سرعته تظل ثابتة فى المقدار والاتجاه . هاتان الخبرتان السابقتان تقترحان إذن أن الجاذبية لا تؤثر على الضوء بأى قوة كانت .

ومع ذلك فقد استطاع ألبرت أينشتين فى سنوات ما قبل الحرب العالمية الأولى وأثناءها تطوير نظرية جديدة للجاذبية تتميز بأنها أكثر تعقيدًا وأعم من نظرية نيوتن للجاذبية ، وتعرف هذه النظرية **بنظرية النسبية العامة** . وتعتبر الجاذبية فى إطار هذه النظرية بمثابة نتيجة مترتبة على الخواص الهندسية للفراغ . ولتفهم معنى هذا التأكيد المثير للبس ، لنناقش ما نتخيله دائمًا عند الحديث عن الخطوط المستقيمة .

طبقًا لما ذكر فى الفصل الثانى ، يمكن تعريف الخط المستقيم بأنه أقصر مسافة بين نقطتين ، وتعرف مثل هذه الخطوط عادة باسم **الخطوط الجيوديسية** . وعندما يطلب منا رسم خط مستقيم فإننا نفعل ذلك دائمًا على سطح مستو كورقة الكراسة مثلاً . ولكن لنفرض أننا قد أعطينا كرة بيضاء عليها نقطتان ثم طلب منا رسم خط مستقيم بين هاتين النقطتين على سطح الكرة . قد يكون أول رد فعل لنا فى هذه الحالة أن نقول أن ذلك مستحيل ، لأن كل خط على سطح الكرة لا يمكن إلا أن يكون منحنيًا . ولكن عند الالتزام بتعريف الخط المستقيم بأنه أقصر مسافة بين النقطتين ؛ قد نقوم عندئذ برسم خط يمثل جزءًا مما يسمى **الدائرة العظمى** ، وهى دائرة ينطبق مركزها مع مركز الكرة . والنتيجة فى هذه الحالة ، كما هو مبين بالشكل 19-7 ، تبدو شبيهة إلى حد كبير بخط منحن ، ولكن هذا الخط يتطابق مع تعريف « الخط المستقيم » فى الفراغ ثنائى البعد المعرف بسطح الكرة . والواقع أن الفرق بين السطحين ثنائيى البعد للكرة والورقة المستوية يتمثل فى خاصية للفراغ تسمى **الانحناء** . وبالرغم من إمكانية تمثيل الانحناء فى بعدين ، إلا أن تمثيل الانحناء بالرسم فى ثلاثة أبعاد أمر مستحيل . لذلك فإننا نحاول استخدام الوصف فى بعدين لأغراض المقارنة فقط .



(أ)



(ب)

شكل 19-7 :
الخطوط الجيوديسية (أ) على سطح مستو ، (ب) على سطح كرة . الخط AB يعتبر خطا مستقيما فى كل من هذين الفراغين ثنائيى البعد .

تفترض نظرية أينشتين أن الفضاء الخالى ، أى الفراغ بدون مادة ، « مستوى » فى ثلاثة أبعاد . علاوة على ذلك يقترح أينشتين أن وجود الكتلة يدخل انحناء فى الفراغ ، وأنه كلما زادت الكتلة زاد انحناء الفراغ بالقرب من هذه الكتلة . وتبين النظرية أيضًا أن مقدار الانحناء يكون محسوسًا فقط عندما تكون الكتلة كبيرة كبرًا فلكيًا كالنجم مثلاً . وعلى هذا الأساس يمكن القول أن انحناء الفراغ بسبب انحراف مسار الجسم المتحرك عن الخط المستقيم عند مروره بالقرب من جسم ذى كتلة هائلة . وبناء على ذلك فإن نيوتن ، **الذى يفترض أن الفراغ غير منحن** ، سوف ينظر إلى هذا المسار « المنحنى » على أنه نتيجة لعجلة تسببها قوى التجاذب التثاقلى المؤثرة على الجسم . وعلى العكس من ذلك ، فإن وجهة نظر أينشتين للجاذبية هى أن المسار المنحنى مرتبط بمقدار انحناء الفراغ الناتج عن الجسم .

لنحاول الآن تطبيق أفكار أينشتين على مسارات الضوء . لقد أوضحنا سابقًا أن الضوء يسير فى خطوط مستقيمة (الخطوط الجيوديسية) . ولكن الخط الجيوديسى فى الفراغ المنحنى يختلف عنه فى حالة ما إذا كان الفراغ مستويًا . تذكر مقارنة الخطوط المستقيمة على سطح كرة بالخطوط المستقيمة على الورق المستوى وهكذا اقترح أينشتين أنه إذا أمكننا رصد الضوء المتحرك على استقامة خط جيوديسى بالقرب من كتلة كبيرة فإننا سنرى أن الضوء سيكون منحرفًا عن الخط الجيوديسى فى فراغ مستو بسبب الانحراف الناتج عن الكتلة الكبيرة . وإحدى طرق تحقيق ذلك هى أن نرصد الضوء المنبعث من نجم بعيد عند مروره بالقرب من الشمس فى طريقه إلى تلسكوبنا . فإذا كان أينشتين محقًا ، فإن انحناء الفراغ بالقرب من كتلة الشمس لابد أن يغير مسار الضوء ، ومن ثم إلى زحزحة الوضع الظاهرى للنجم عن موضعه فى حالة عدم وجود النجم والشمس على خط واحد ؛ وهذه الظاهرة مبينة بالشكل 20-7 . وباستخدام لغة الفيزياء الكلاسيكية لنيوتن يمكننا القول أن الشمس تؤثر على الضوء بقوة معينة مسببة بذلك انحناء مساره . ولكن قانون الجاذبية لنيوتن لا يتضمن شيئًا يمكن أن يتنبأ بمثل هذا التفاعل بين الكتلة والضوء .

وفى عام 1919 كان من المتوقع حدوث كسوف كلى للشمس عند وجود الشمس على خط مستقيم واحد مع مجموعة النجوم اللامعة المعروفة باسم **هيادیس** Hyades . ومن المعروف أنه أثناء الكسوف يمكن رصد النجوم التى تظهر قريبة جدًا من حافة الشمس . بناء على ذلك قام أينشتين بإجراء حساباته فوجد أن اتجاه الضوء « المحتك » بالشمس يجب أن تتزحزح طبقًا لنظريته بمقدار 1.745 ثانية ، وأن الوضع الظاهرى للنجم يجب أن يتزحزح كذلك بنفس هذه الزاوية . (الثانية من الزاوية تساوى 1/3600 درجة . وتستطيع التلسكوبات الحديثة قياس زوايا أقل من الثانية بكثير) . وعلى الفور قامت الجمعية الفلكية الملكية البريطانية* بإرسال فرقتين لاختبار نظرية أينشتين ، إحداهما إلى غرب أفريقيا والأخرى إلى شمال البرازيل . وقد تمكن كلا الفريقان من رصد هذه الظاهرة ، كما أثبتت القياسات التى أجريت فيما بعد فى أحد عشر كسوفًا متتالية أن متوسط قيمة زحزحة النجم لا تختلف عن القيمة التى تنبأ بها أينشتين إلا فى حدود 0.2 فى المائة .

شكل 20-7 :
انثناء ضوء النجم تحت تأثير الشمس . الضوء المنبعث من النجم A ينحرف عند مروره بالقرب من الشمس فى طريقه إلى الأرض . ويمكن ملاحظة أن الاتجاه الظاهرى B قد تزحزح زاوية قدرها ϕ ، وقد تنبأ أينشتين بأن قيمة ϕ تساوى 1.745 ثانية زاوية .

فى عام 1916 نجح الفيزيائى الألمانى كارل شفارتزشيلد فى اشتقاق نتيجة أكثر إدهاشًا وغرابة عن انحناء الفضاء . تنبأ هذا الرجل بأن نجمًا ذا كتلة هائلة جدًا وحجم صغير جدًا يمكنه أن يسبب انحناءً شديدًا للفراغ القريب من النجم لدرجة أنه يستطيع أن يأسر أى ضوء يمر قريبًا منه وعلى بعد أقل من مسافة معينة تسمى أفق الحدث . هذه المسافة R تعطى بالعلاقة :

* The British Royal Astronomical Society .

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

حيث c مقدار سرعة الضوء ويساوى 3×10^8 m/s . وإذا كانت M تساوى كتلة الشمس سنجد أن R تساوى حوالى 3 km . بأسلوب آخر ، إذا أمكن للشمس أن تنطوى وتتضاءل إلى كرة بهذا الحجم أو أصغر من ذلك فإن الضوء المار بالقرب من هذه الشمس المتضائلة وعلى بعد أقل من هذه المسافة لن يستطيع الهروب من جاذبيتها الهائلة . وهكذا فإن هذه الأجسام التى لا يستطيع حتى الضوء أن يهرب منها لن ينبعث منها أى نوع من الطاقة ، ولذلك فهى تسمى **الثقوب السوداء** . ولكى يتكون الثقب يجب أن تكون كتلة النجم أكبر من حوالى ثلاثة أمثال كتلة الشمس . وقد رصدت بالفعل نجوم تزيد كتلتها عن هذا القدر ، ولذلك يعتقد الفلكيون أن هذه النجوم سوف تتضاءل فى نهاية الأمر متحولة إلى ثقوب سوداء مثلما حدث لمثيلاتها فيما مضى . وبالرغم من أن مثل هذه الأجسام لا يمكن مشاهدتها بطريقة مباشرة فإن العجلة الهائلة التى تكسبها هذه الأجسام للمادة خارج آفاق حدثها لابد أن تؤدى إلى إنتاج أشعة سينية كثيفة جدًا . وهذه يمكن كشفها بمساعدة التلسكوبات الملائمة على التوابع الأرضية . والواقع أن الأعداد المتزايدة من نتائج رصد هذه الأشعة السينية التى تحققت أخيرًا قد تكون برهانًا مقنعًا على أن الثقوب السوداء موجودة بالفعل .

يستنتج مما سبق إذن أن الضوء يتأثر بوجود الكتلة ، ولكن بطريقة لا يمكن تفسيرها على أساس قانون الجاذبية العام لنيوتن . ومرة ثانية نؤكد أن تفسير مثل هذه الظواهر الجديدة لن يصبح ممكنًا إلا باستخدام الإنجازات العلمية للقرن العشرين ، والتى أدت إلى تحوير وتعديل قوانين الفيزياء الكلاسيكية بدرجة كبيرة .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل ينبغى أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الزاوية نصف القطرية ، (ب) السرعة الزاوية ، (جـ) العجلة الزاوية ، (د) المسافة المماسية . (هـ) السرعة المماسية ، (و) العجلة المماسية ، (ز) العجلة الجاذبة المركزية (أو العجلة نصف القطرية) . (ح) القوة الجاذبة المركزية ، (ط) الوزن الظاهرى .

2 ـ تحويل الزاوية بالدرجات أو الزاوية نصف القطرية أو الدورات إلى بعضها البعض .

3 ـ كتابة المعادلات الخمس للحركة الزاوية واستخدامها فى حل المسائل .

4 ـ تحويل الكميات المماسية والزاوية والخطية إلى بعضها البعض .

5 ـ ربط الكميات الزاوية بالكميات الخطية فى حالة العجلات الدائرة والخيط المفكوك من على مكب (بكرة الخيط) .

6 ـ شرح لماذا يتسارع جسم متحرك بسرعة ثابتة المقدار على محيط دائرة . ذكر مقدار واتجاه العجلة .

7 ـ تحليل المخطط البيانى للجسم الحر فى حالة جسم يتحرك فى دائرة وتطبيق قانون نيوتن الثانى الذى يربط القوة الجاذبة المركزية بالعجلة الجاذبة المركزية .

8 ـ حساب قوة التجاذب التثاقلى التى يؤثر بها جسم على آخر .

9 ـ حساب القوة الحاملة المؤثرة على جسم معلوم الكتلة إذا كان الجسم (أ) متحركًا بسرعة ثابتة ، (ب) متسارعًا إلى أعلى ، (جـ) متسارعًا إلى أسفل . شرح معنى الوزن الظاهرى فى هذه الظروف ، وتفسير لماذا يختلف الوزن الظاهرى عن وزن الجسم .

10 ـ شرح لماذا يقال أن الجسم الذى يدور حول الأرض (أو فى موقف مشابه) يوجد فى حالة سقوط حر . استخدام أسلوبك الخاص لتوضيح لماذا يبدو الجسم عديم الوزن فى هذه الظروف .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

الثابت العام للجاذبية :

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \text{N.m}^2/\text{kg}^2$$

القياس نصف القطرى :

$$1\ \text{rad} = \frac{1}{2\pi}\ \text{rev} \approx 57.3^\circ$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

القياس الزاوى :

الإزاحة الزاوية (θ) :

$$\theta(\text{rad}) = \frac{\text{طول القوس}}{\text{نصف القطر}} = \frac{s}{r} \qquad (7\text{–}1)$$

السرعة الزاوية (ω) :

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \qquad (7\text{–}2)$$

العجلة الزاوية (α) :

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \qquad (7\text{–}4)$$

معادلات الحركة الزاوية (عند ثبوت α) :

$$\theta = \bar{\omega} t \qquad (\text{أ}7\text{–}5)$$

$$\omega_f = \omega_i + \alpha t \qquad (\text{ب}7\text{–}5)$$

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2}\left(\omega_f + \omega_i\right) \qquad (\text{جـ}7\text{–}5)$$

$$2\alpha\theta = \omega_f^2 - \omega_i^2 \qquad (\text{د}7\text{–}5)$$

$$\theta = \omega_i t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \qquad (\text{هـ}7\text{–}5)$$

خلاصة :

1 ـ القياسات الزاوية لا بعدية ، ولكنها مفيدة حتى يظل نوع القياس (زاوية نصف قطرية ، دورة ، درجة) واضحًا لك أثناء الحسابات

2 ـ يوجد « اتجاهان » متضادان للدوران يجب تحديدهما فى الحسابات . تستخدم الإشارة + للدوران فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة . والإشارة − للدوران فى اتجاه دوران عقارب الساعة .

العجلة الجاذبة المركزية (a_c) :

الجسم المتحرك فى دائرة نصف قطرها r بسرعة ثابتة المقدار v يقع تحت تأثير عجلة متجهة نحو مركز الدائرة .

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \tag{7-9}$$

القوة الجاذبة المركزية (F_c) :

لكى تكون الحركة الدائرية ممكنة يجب أن يؤثر على الجسم صافى قوة اتجاهه نحو مركز الدائرة :

$$F_c = ma_c = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r \tag{7-10}$$

خلاصة :

القوة F_c لا تبذل شغلاً على الجسم ولا تغير مقدار سرعته لأنها دائمًا عمودية على اتجاه السرعة .

قانون الجاذبية العام :

قوة الجاذبية بين جسمين كتلتاهما m_1 ، m_2 تفصلهما مسافة r هى :

$$F_g = \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \tag{7-11}$$

خلاصة :

1 ـ فى حالة الأجسام ذات التماثل الكروى تكون r هى المسافة بين مركزى الكتلتين .

2 ـ قوة الجاذبية هى دائمًا قوة تجاذبية ، تميل إلى جذب أحد الجسمين إلى الآخر .

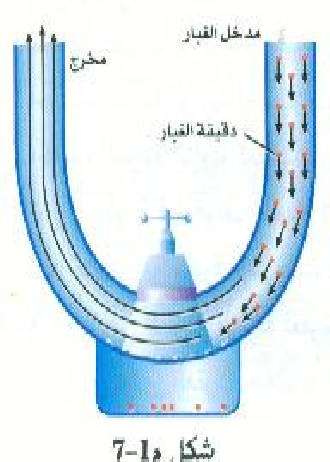
أسئلة وتخمينات

1 ـ تدور عجلة حول محورها بسرعة زاوية ثابتة المقدار ω . صف ما يلى بالنسبة لنقطة P نصف قطر دورانـها يساوى r مقاسًا من المركز واذكر كيـف تتغير كـل كمية مـع r : (أ) السرعة الماسية ، (ب) السرعة الزاوية ، (جـ) العجلة الزاوية ، (د) العجلة الماسية ، (هـ) العجلة الطاردة المركزية .

2 ـ عند استبدال إطارات السيارة الأصلية بإطارات يزيد قطرها عن الإطارات الأصلية بمقدار 15 فى المائة ستكون قراءة مقياس السرعة غير صحيحة . اشرح كيف يمكن إيجاد القراءة الصحيحة من القراءة الفعلية .

3 ـ فى أى اتجاه يطير الطين عن تطايره من إطار دراجة متحركة ؟ اشرح .

4 ـ يمثل الشكل م1−7 نموذجًا مبسطًا لمزيل غبار من النوع الإعصارى المستخدم لتنقية العوادم الغازية الصناعية قبل إطلاقها إلى الجو . ويتم ذلك بأن يدار الغاز بسرعة عالية فى مسار منحن فتتجمع دقائق الغبار عنـد الحافـة الخارجيـة حيث تـزال بالاستعانة برذاذ مائى أو أى طريقـة أخرى . اشرح المبدأ الذى بنيت على أساسه هذه الطريقة .



شكل م1−7

5 ـ ناقش دورة التجفيف المغزلى فى الغسالة الأتوماتيكية .

6 ـ تستقر حشرة على أسطوانة فونوغراف موضوعة على المنضدة الدوارة . صف كيفية حركة الحشرة عندما تبدأ الأسطوانة فى الدوران . افترض أن الحشرة قريبة جدًا من محور الدوران وأن هناك بعض الاحتكاك ، ولكن ليس كبيرًا ، بين الحشرة وسطح الأسطوانة .

7 ـ عجلة الجاذبية على القمر تساوى $1.67\ m/s^2$. كيف تغير هذه العجلة حياة الإنسان عما تعوده فى حياته على الأرض ؟

8 ـ لكى يكتسب شخص عجلة أفقية قدرها $5\ g$ ، حيث $g = 9.8\ m/s^2$ ، يجب أن تؤثر عليه قوة قدرها « 5 g's » . ما معنى هذا ؟ ماذا نعنى عندما نقول أن طيارًا يتعرض لقوة قدرها بضعة g's عندما تهبط الطائرة هبوطًا حادًا ؟ لماذا قد « يغشى على » الطيار إذا كان اعتداله بعد الانقضاض سريعًا جدًا ؟

9 ـ يدور القمر حول الأرض فى مدار نصف قطره $3.8 \times 10^8\ m$. استخدم هذه المعلومة لتقدير كتلة الأرض .

10 ـ هل يمكن إيجاد كتل الكواكب الأخرى فى النظام الشمسى إذا علمنا أنصاف أقطار مداراتها وكتلة الأرض ؟

11 ـ ما القيمة التقريبية التى يمكن أن تتحرك بها سيارة أثناء انعطافها من شارع إلى آخر عمودى عليه ؟ افترض أن الشارعين مرصوفين بالخرسانة وأن كل منهما يحتوى على حارة مرورية واحدة فى كل اتجاه .

12 ـ أثناء طيران أبوللو 13 إلى القمر فى عام 1970 تعرضت السفينة لمشكلة خطيرة عندما كانت فى منتصف الطريق تقريبًا ، فاضطرت إلى العودة دون إكمال مهمتها إلى القمر . وبعد إصلاح العطل استمرت السفينة فى الحركة تجاه القمر ومرت من خلفه وعندئذ فقط عادت إلى الأرض . لماذا لم يدر رواد الفضاء سفينتهم إلى الخلف ببساطة بعد إصلاح العطل ؟

13 ـ لنفرض أن كتلة ضخمة جدًا ، أكبر كثيرًا من كتلة النظام الشمس أو مجرتنا كلها ، وقد خلقت فى هذه اللحظة فى مكان بعيد من الفضاء . وعندئذ سوف يبدأ النظام الشمسى فى التسارع تجاه هذه الكتلة الكبيرة تحت تأثير قوة الجاذبية المؤثرة عليه بعد مرور الثوان القلائل الأولى من حدوث ذلك ، ما هى التأثيرات بعيدة المدى التى سوف نلاحظها على الأرض بسبب هذه العجلة ؟ افترض أن عجلة الأرض الناتجة عن هذا السبب فى حدود $10\ m/s^2$.

مسائل

الأقسام من 7-1 إلى 7-4

1 ـ عبر عن كل من الزوايا الآتية بالدرجات والدورات والزوايا نصف القطرية : (أ) $32°$ ، (ب) $2.65\ rad$ ، (جـ) $0.67\ rev$

2 ـ عبر عن كل من الزوايا الآتية بالدرجات والدورات والزوايا نصف القطرية : (أ) $0.29\ rev$ ، (ب) $195°$ ، (جـ) $1.35\ rad$.

3 ـ تحمل عجلة روليت نصف قطرها $85\ cm$ رقمين على حافتهما يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قدرها $2.8\ cm$ على طول الحافة . أوجد الزاوية التى يحصرها هذان الرقمان عند مركز العجلة . عبر عن الإجابة بالزوايا نصف القطرية والدرجات والدورات .

4 ـ نقطتان على سطح كرة نصف قطرها $33\ cm$ والمسافة بينهما $4.1\ cm$ مقاسة على طول السطح . أوجد الزاوية المحصورة بين النقطتين عند مركز الكرة . عبر عن إجابتك بالزوايا نصف القطرية والدرجات والدورات .

5 ـ احسب السرعة الزاوية لعقرب الثوانى فى ساعة يد بالزوايا نصف القطرية لكل ثانية وبالدورات لكل دقيقة .

6 ـ احسب السرعة الزاوية لعقرب الدقائق فى ساعة يد بالدرجات لكل ثانية وبالزوايا نصف القطرية فى الساعة .

7 ـ تدور أسطوانة فونوغراف بمعدل $33.3\ rev/min$. (أ) ما مقدار سرعتها الزاوية بالزوايا نصف القطرية فى الثانية ؟ (ب) بأى زاوية مقدرة بالدرجات تدور الأسطوانة خلال $0.225\ s$ ؟

8 ـ (أ) ما هى السرعة الزاوية لعقرب الساعات فى ساعة حائط بالزوايا نصف القطرية لكل ثانية ؟ (ب) بأى زاوية مقدرة بالدرجات يدور العقرب خلال $18\ s$ ؟

9 ـ تتسارع المنضدة الدوارة لفونوغراف من السكون إلى سرعة زاوية مقدارها 33.3 rev/min خـلال 0.77 s . مـا متوسـط مقدار العجلة الزاوية بالدورات فى الثانية المربعة وبالزوايا نصف القطرية لكل ثانية مربعة ؟

10 ـ تتهادى المنضدة الدوارة لفونوغراف تتحرك بمعدل 33.3 rev/min إلى السكون خلال 10.5 s . ما مقدار عجلتـها الزاويـة المتوسطة بالدورات لكل ثانية مربعة وبالزوايا نصف القطرية لكل ثانية مربعة ؟

11 ـ تستغرق دوامة الخيل (من ألعاب الملاهى) زمنًا قدره 22 s لكـى تتسـارع مـن السكون إلى سـرعة التشغيل وقدرها 3.75 rev/min . أوجد (أ) عجلتها بالدورات لكل ثانية مربعة. (ب) عدد الدورات خلال هذا الزمن .

12 ـ ما مقدار العجلة الزاوية (بالزوايا نصف القطرية لكل ثانية مربعة) التى يجب أن تكتسبها عجلة إذا أريد لـها أن تتسارع من السكون إلى سرعة دورانية مقدارها 540 rad/s بعد 7.0 rev ؟

13 ـ تصل عجلة روليت متحركة إلى السكون خـلال 18.5 s . فإذا دارت العجلة 9.5 rev خـلال ذلك الزمن ، فبأى سرعة كانت العجلة تدور فى البداية ؟

14 ـ تسارعت عجلة تدور بمعدل 32 rev/min فوصلت سرعتها إلى 48 rev/min بعد 17.5 s . أوجد (أ) مقدار العجلـة الزاويـة بالزوايا نصف القطرية لكل ثانية مربعة ، (ب) عدد الدرجات التى دارتها هذه العجلة خلال ذلك الزمن .

القسم 5-7

15 ـ مروحة سقف يبعد طرف ريشتها عن المركز 95 cm وتدور بمعـدل 0.76 rev/min . بـأى سـرعة يتحـرك طرف الريشة بالسنتيمترات فى الثانية ؟

16 ـ تدور دوامة خيل (من ألعاب الملاهى) بمعدل 3.65 rev/min . ما سرعة طفل نصف قطر دائرة دورانه 2.75 m بالأمتـار فى الثانية ؟

17 ـ تتدحرج كرة بولينج قطرها 23.5 cm مسافة قدرها 15.6 على الأرضية بدون انزلاق . ما عدد الدورات التى تتدحرجها الكرة ؟

18 ـ إذا كان قطر عجلة سيارة 72 cm ، فما عدد الدورات التى تدورها العجلة عندما تقطع السيارة مسافة قدرها 550 cm ؟

19 ـ تتحرك مركبة بعجلة قدرها $0.376\ m/s^2$. ما مقدار العجلة الزاوية لحركة عجلة المركبة إذا كان قدرها 65 cm ؟

20 ـ يرفع جسم بالاستعانة بحبل ملفوف على حافـة عجلة نصف قطرها 43 cm . إذا كـانت عجلة حركـة العجلـة الرافعـة $0.36\ rad/s^2$ ، فما مقدار عجلة الجسم بالأمتار لكل ثانية مربعة ؟

21 ـ نصف قطر الأرض يساوى $6.37 \times 10^6\ m$. (أ) ما سرعة حركة شجرة عند خط الاستواء ، بالأمتـار فـى الثانيـة ، نتيجة لحركة الأرض ؟ وما سرعة دب قطبى عند القطب الشمالى ؟

22 ـ تدور الأرض حول الشمس مرة كل 365.25 يومًا . ما مقدار سرعة الأرض فى مدارهـا بالأمتـار فـى الثانيـة ؟ المسافة بـين الأرض والشمس 1.5×10^{11} .

23 ـ يلتف خيط حول حافة عجلة قطرها 35.5 cm أثناء دورانها بمعدل 0.71 rev/s . ما طول الخيط الملتف خلال 20 s ؟

24 ـ تـدور عجلة قطرها 7.8 cm بمعدل 2450 rev/min . فإذا كان هناك خيط يلتف على العجلة أثناء الدوران ، فما طول الخيط الملتف خلال 5.0 s .

25 ـ تتحرك مركبة فى طريق بسرعة مقدارها 25.5 m/s . إذا كان قطر عجـلات المركبـة 106 cm ، فما مقدار سرعة دوران العجلات بالدورات لكل ثانية والزوايا نصف القطرية فى الثانية والدرجات فى الثانية ؟

26 ـ أفلتت عجلة قطرها 55 cm من سيارة متحركة بسرعة مقدارها 27 m/s واستمرت فى الدحرجة بجـانب السيارة . أوجد مقدار السرعة الزاوية للعجلة بالدورات فى الثانية والزوايا نصف القطرية فى الثانية والدرجات فى الثانية .

27 ـ بدأت دراجة قطر عجلاتها 62.5 cm في التقاصر بانتظام عندما كانت سرعتها 6.6 m/s فتوقفت بعد 38 s . (أ) ما المسافة المقطوعة خلال هذه الفترة ؟ (ب) ما عدد الدورات التي تدورها العجلتان قبل وصول الدراجة إلى السكون ؟

28 ـ بدأت سيارة قطر عجلاتها 72.5 cm الحركة من السكون وتسارعت بانتظام حتى وصل مقدار سرعتها إلى 21.5 m/s بعد زمن قدره 36 s . كم دورة دارتها كل من عجلات السيارة خلال هذا الزمن ؟

■ 29 ـ تباطأت حركة موتور دائر بمعدل 1660 rev/min بانتظام فوصل إلى حالة السكون خلال 16 s . (أ) أوجد التقاصر الزاوي للموتور وعدد الدورات التي دارها الموتور قبل التوقف . (ب) إذا كان الموتور يحمل عجلة نصف قطرها 6.25 cm مثبتة في عموده ، فما طول السير الذي يلتف على العجلة خلال هذا الزمن ؟

■ 30 ـ عجلتان مسننتان معشقتان إحداهما في الأخرى نصفا قطريهما 0.65 cm و 0.15 cm . كم دورة يجب أن تدورها العجلة الصغيرة عندما تدور الكبيرة بمقدار 4.5 rev ؟

■ 31 ـ تتسارع سيارة من السكون فتصل إلى سرعة مقدارها 17.5 m/s بعد 23.6 s . أوجد العجلة الزاوية لإحدى عجلاتها وعدد الدورات التي تدورها العجلة في هذه العملية . نصف قطر عجلة السيارة 0.40 .

■ 32 ـ يجرى سير على عجلة نصف قطرها 44 cm . وخلال الزمن الذي استغرقته العجلة في التقاصر بانتظام من سرعة ابتدائية قدرها 1.8 rev/min إلى السكون مر طول قدره 29.5 m من السير على العجلة . أوجد تقاصر العجلة وعدد دوراتها أثناء فترة التوقف .

القسمان 6-7 و 7-7

33 ـ تنعطف سيارة كتلتها 1420 kg في منحنى نصف قطره 37.5 m أثناء حركتها بسرعة مقدارها 21.2 m/s . ما مقدار القوة الأفقية اللازمة لحفظ السيارة في مسارها ؟

34 ـ تدور كتلة مقدارها 380 g مثبتة في طرف خيط في دائرة أفقية نصف قطرها 75 cm . إذا كان مقدار سرعة الكتلة في المسار الدائري 7.7 m/s ، ما مقدار الشد في الخيط ؟ إهمل قوة الجاذبية .

35 ـ تدور سيارة في مسار منحن نصف قطره 26 m بسرعة مقدارها 16.5 m/s وهي تحمل كرتونة بيض على مقعد أفقي فيها . ما هي القيمة الصغرى لمعامل الاحتكاك اللازم وجوده بين الكرتونة والمقعد حتى لا تنزلق الكرتونة ؟

36 ـ تقف حشرة صغيرة كتلتها 22.7 mg على الحافة الملساء لأسطوانة فونوغراف نصف قطرها 30 cm . بدأت الأسطوانة في الدوران ببطء من السكون ووصلت إلى السرعة المعتادة وهي 33.3 rev/min . ما مقدار معامل الاحتكاك اللازم بين الحشرة والأسطوانة لكي لا تنزلق الحشرة ؟ (يمكن إهمال الاحتكاك الهوائي لأن الحشرة دقيقة جدًا) .

37 ـ في إحدى التجارب البحثية تعرض شخص لعجلة قيمتها 5.3 g ، وقد تحقق ذلك بإدارة هذا الشخص في دائرة أفقية بسرعة عالية جدًا . فإذا كانت المسافة بين مقعد هذا الشخص ومحور الدوران 11.3 m ، ما مقدار السرعة الدورانية لهذا الشخص بالدورات في الثانية ؟

■ 38 ـ من الحيل القديمة الشهيرة أن تحمل دلوًا من الماء في يدك ثم تديره في دائرة رأسية . وإذا كان معدل الدوران كبيرًا بدرجة كافية فإن الماء لن يسقط من الدلو عندما يكون الدلو مقلوبًا رأسًا على عقب في قمة مساره . ما هي القيمة الصغرى لمقدار سرعة يدك عند قمة الدائرة إذا أريد لهذه الحيلة أن تنجح ؟ افترض أن طول يدك 0.72 m .

■ 39 ـ يريد أحد مصممي الأفعوانية (القطار الملتوي في الملاهي) أن يحس الركاب بانعدام الوزن عند قمة تل معين . بأي سرعة يجب أن تتحرك العربة إذا كان نصف قطر الانحناء عند قمة التل 30 m ؟

40 ـ فى بعض أجهزة الطرد المركزى ذات السرعة الفائقة يدار المحلول بسرعة زاوية مقدارها 5000 rev/s بنصف قطر قدره 15 cm . ما مقدار العجلة الجاذبة المركزية لكل جسيم فى المحلول ؟ قارن القوة الجاذبة المركزية لحفظ جسيم كتلته m فى المسار الدائرى بوزن هذا الجسيم mg .

41 ـ نظرًا لأن كرات الدم الحمراء وغيرها من الجسيمات العالقة فى الدم خفيفة جدًا فى الوزن فإن من الصعوبة بمكان أن ترسب تلقائيًا عند ترك الدم ساكنًا . بأى سرعة (بالدورات فى الثانية) يجب إدارة عينة من الدم فى جهاز طرد مركزى نصف قطره 8.5 cm إذا كانت القوة الطاردة المركزية اللازمة لحفظ الجسيمات فى مسار دائرى تساوى 1200 مرة قدر وزن الجسيم mg ؟ لماذا تنفصل الجسيمات من المحلول فى جهاز الطرد المركزى ؟

42 ـ تنعطف سيارة فى منحنى على طريق مستو . إذا كانت كتلة السيارة m وقوة الاحتكاك بين إطارات السيارة والطريق 0.58 mg ، فبأى سرعة يجب أن تتحرك السيارة حتى يتم انعطافها بنجاح إذا كان نصف قطر المنحنى 31.5 m ؟

القسم 7-9

43 ـ النيوترون جسيم غير مشحون كتلته 1.67×10^{-27} kg ونصف قطره فى حدود 10^{-15} m . أوجد قوة التجاذب التثاقلى بين نيوترونين المسافة بين مركزيهما 1.00×10^{-12} m . قارن هذه القوة بوزن النيوترون على الأرض .

44 ـ أوجد قوة الجاذبية التى يؤثر بها القمر على طالب كتلته 70 kg يقع فى نقطة مواجهة له على سطح الأرض . كتلة القمر 7.3×10^{22} kg وبعده عن الأرض 3.8×10^{5} km . قارن هذه القوة بوزن الطالب على سطح الأرض .

45 ـ قارن قوة الجذب التثاقلى المؤثرة على سفينة فضاء على سطح الأرض بقوة الجذب التثاقلى المؤثرة عليها عندما تدور فى مدار يرتفع بمقدار 5000 km عن سطح الأرض . (نصف قطر الأرض 6380 km) .

46 ـ المشترى كوكب كتلته 314 مرة قدر كتلة الأرض ونصف قطره 11.3 مرة قدر نصف قطر الأرض . أوجد عجلة الجاذبية على المشترى .

47 ـ عجلة الجاذبية على القمر تساوى سدس عجلة الجاذبية على الأرض فقط . بفرض أن تركيبى القمر والأرض متماثلان ، فى المتوسط ، ماذا تتوقع أن يكون نصف قطر القمر بدلالة نصف قطر الأرض R_E ؟ (الحقيقة أن نصف قطر القمر $0.27\,R_E$) .

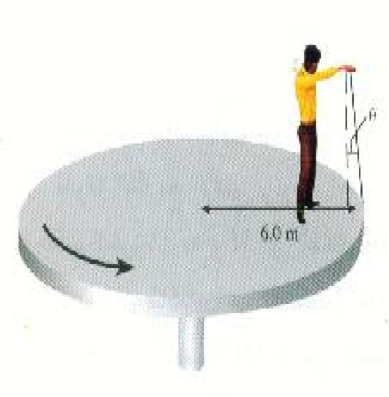
■ 48 ـ يدور تابع أرضى حول الأرض مرة واحدة لكل 80 min تقريبًا عندما يكون نصف قطر مداره 6500 km . استخدم هذه البيانات لإيجاد كتلة الأرض .

■ 49 ـ يدور أحد توابع كوكب المشترى ، ويسمى كاليستو ، حول المشترى مرة كل 16.8 يوما فى مدار نصف قطره 1.88×10^{9} m استخدم هذه البيانات لإيجاد كتلة المشترى .

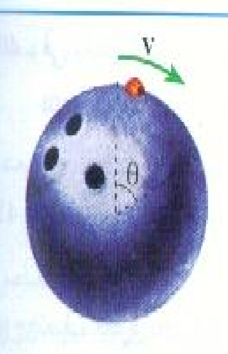
مسائل عامة

■■ 50 ـ أديرت كرة كتلتها 450 g مثبتة فى طرف خيط فى دائرة أفقية تقريبًا نصف قطرها 1.25 m ، وكانت سرعتها المماسية فى الدائرة 8.5 m/s . **لا تهمل** وزن الكرة ، وكذلك لا يمكن أن يكون الخيط أفقيًا تمامًا . (أ) ما مقدار الشد فى الخيط ؟ (ب) ما قيمة الزاوية التى يصنعها الخيط مع الأفقى ؟

■■ 51 ـ يمثل الشكل م2-7 رجلاً على منصة دوارة يحمل بندولاً فى يده ، ويقع البندول على بعد قدره 6.8 m من مركز المنصة . وقد وجد أن البندول يتعلق صانعًا زاوية θ مع الرأسى عندما تكون المنصة دائرة بسرعة دورانية مقدارها 0.045 rev/s . أوجد θ .



شكل م2-7



شكل م3–7

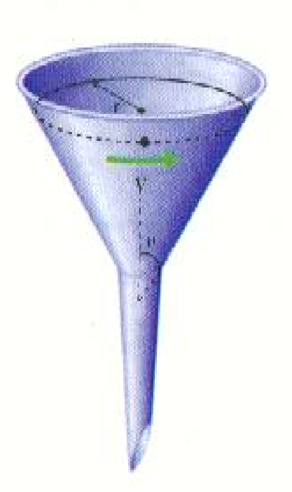
52 ـ فقدت الحشرة الصغيرة المبينة بالشكل م3–7 رسوخ أقدمها عندما كانت قريبة من قمة كرة البولينج ، فانزلقت على الكرة إلى أسفل بدون احتكاك يذكر . أثبت أنها سوف تفقد التلامس مع سطح الكرة عند الزاوية θ ، حيث $\cos\theta = 2/3$.

53 ـ يمثل الشكل م4–7 تصميمًا ممكنًا لمستعمرة فضائية . تتكون هذه المستعمرة من أسطوانة سابحة فى الفضاء قطرها 7 km وطولها 30 km ، وتحتوى بداخلها على بيئة شبيهة بالبيئة الأرضية ؛ ولمحاكاة الجاذبية فإن هذه الأسطوانة تدور حول محورها فى حركة مغزلية . ما مقدار معدل دوران الأسطوانة ؛ بالدورات فى الساعة ، اللازم لكى يضغط شخص واقف على الكتلة الأرضية على الأرض بقوة تساوى وزنه أو وزنها على الأرض .



شكل م4–7

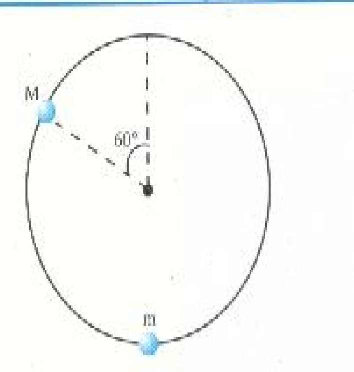
54 ـ يراد لجسيم أن ينزلق فى مسار أفقى داخل القمع المبين بالشكل م5–7 . فإذا كان سطح القمع لا احتكاكيا ، فماذا يجب أن يكون مقدار سرعة الجسيم v ، بدلالة r ، θ ، حتى تتم هذه الحركة بنجاح ؟



شكل م5–7

55 ـ حرر بندول مكون من كرة كتلتها 140 g معلقة فى خيط طوله 225 cm من السكون عندما كان الخيط يصنع زاوية قدرها $65°$ مع الأفقى . أوجد الشد فى الخيط عندما تكون الزاوية $25°$.

56 ـ الخرزتان m و M فى الشكل م6–7 يمكنهما الانزلاق بحرية على دائرة السلك المبينة بالرسم . فى البداية كانت الخرزتان ساكنتين فى الموضعين الموضحين . حررت M من السكون فانزلقت واصطدمت تصادمًا مرنًا مع m . ما أكبر قيمة ممكنة للنسبة m/M لكى تنجح m فى الوصول إلى القمة بحيث لا تؤثر على السلك فى ذلك الموضع بأى قوى إلى أسفل .

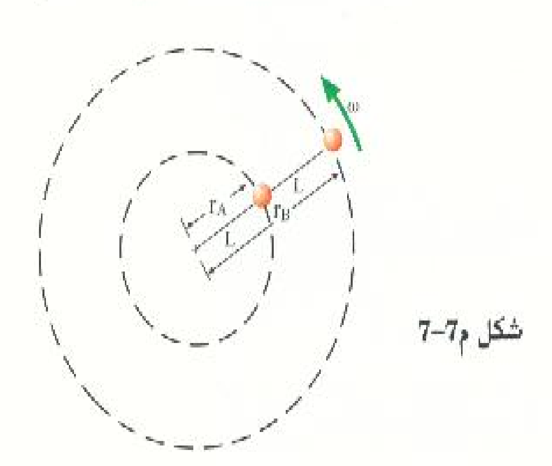


شكل م7-6

■■ 57 ـ لنفرض أن أقصى عجلة تكتسبها سفينة صاروخية إلى أعلى أثناء الانطلاق تساوى $40\ m/s^2$ ، وأن العجلة تصل إلى هذه القيمة عندما تكون السفينة على ارتفاع قدره 10 mi من سطح الأرض . ما الوزن الظاهرى لرائد فضاء وزنه على الأرض 180 lb فى تلك الحالة ؟

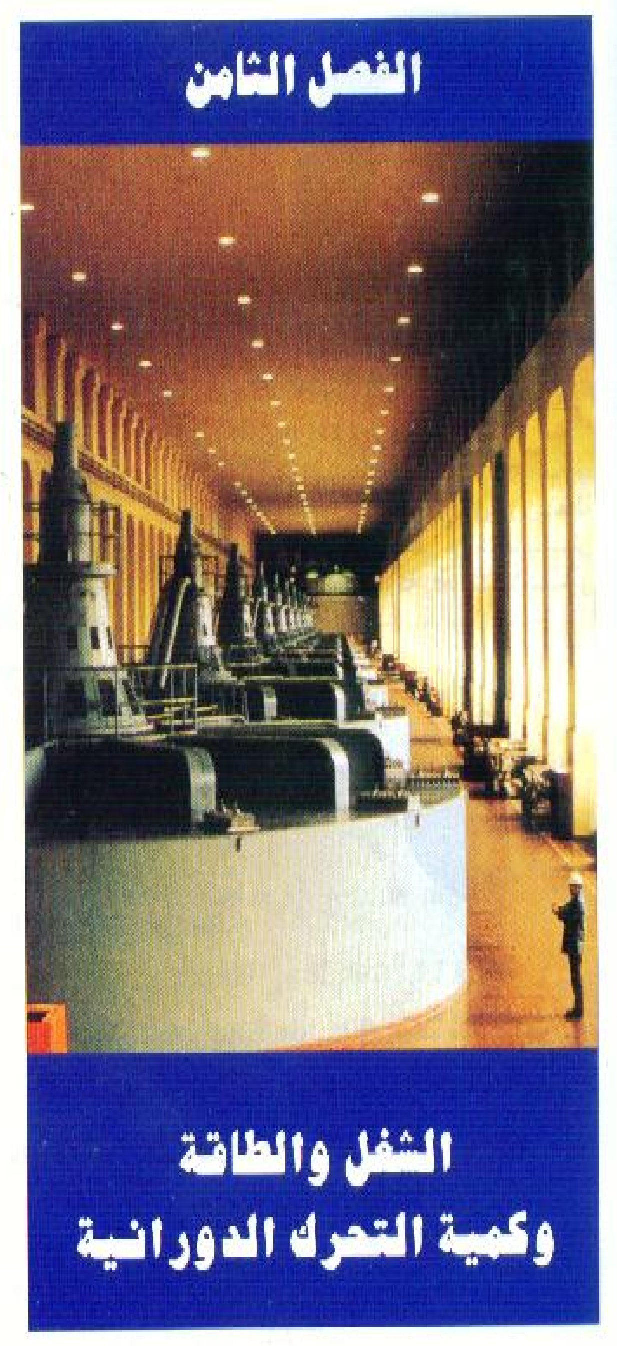
■■ 58 ـ أعد حل المسألة 57 إذا كانت السفينة تكتسب العجلة $40\ m/s^2$ على ارتفاع قدره 1500 m فوق سطح الأرض . هذه العجلة فى اتجاه نصف قطر الأرض إلى الخارج ؟

■■ 59 ـ الكرتان A و B ، وكتلة كل منهما m ، مربوطتان فى طرفى خيط طوله L . ربط أحد طرفى خيط مماثل طوله L أيضًا فى الكتلة A ، وأمسكت امرأة بالطرف الحر للخيط الثانى ثم قامت بإدارة الكرتين فى دائرة أفقية ؛ هذا الموقف موضح بالشكل م7-7 . أى الخيطين ينقطع عندما تزيد سرعة الدوران إلى قيمة كبيرة ، الخيط الذى تمسك المرأة طرفه فى يدها أم الخيط الموصل بين A و B ؟ ما مقدار السرعة الزاوية عندما يحدث ذلك ؟ افترض أن $m = 500\ g$ ، $L = 0.6\ m$ ، وأن مقاومة قطع الخيطين 235 N . إهمل وزن الكرتين ؛ أى اعتبر أن الدائرة أفقية حقًا .



شكل م7-7

■■ 60 ـ وقعت سيارة سباق كتلتها 800 kg بسائقها ووزنه 700 N فى مطب بالطريق نصف قطر انحنائه الرأسى 60 m . سبب هذا السقوط انضغاط السست الحاملة للسيارة انضغاطًا كاملاً للحظة قصيرة عند قاع المطب . فإذا علمت أن انضغاط السست انضغاطًا كاملاً فى حالة سكون السيارة يتطلب قوة قدرها 5000 N بالإضافة إلى وزن السيارة ، فبأى سرعة كانت السيارة تتحرك عندما وقعت فى المطب ؟ ما هو الوزن الظاهرى للسائق فى تلك اللحظة ؟



قانون نيوتن الثانى يربط القوة المؤثرة على جسم بكتلة هذا الجسم وكمية تحركه الخطى : $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. وعندما يدور جسم ، كالعجلة مثلاً ، حول محور فإن **عزوم الدوران** يمكن أن تعطى ذلك الجسم **عجلة زاوية** . وسوف نرى فى هذا الفصل أن الحركة الدورانية تنطبق عليها معادلة مماثلة للمعادلة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ ، هذه المعادلة تربط عزم الدوران المؤثر على جسم بحاصل ضرب عجلته الزاوية فى كمية تمثل مقياسًا للقصور الذاتى الدورانى . وسوف نرى بالإضافة إلى ذلك أن الجسم المتحرك حركة دورانية له طاقة حركة وكمية تحرك دورانى .

8-1 الشغل وطاقة الحركة الدورانيان

من السهل أن نرى أن للجسم الدائر طاقة حركة . فالعجلة المبينة فى الشكل 1-8 مثلاً تتكون من قطع صغيرة من الكتلة يتحرك كل منها أثناء حركة العجلة . فأى جزء صغير من الكتلة ، مثل الجزء m_1 فى الشكل ، له سرعة قدرها $\mathbf{v}_1$ ، وله بالتالى طاقة حركة تساوى $\frac{1}{2}m_1v_1^2$. لنبدأ دراستنا لخواص الأجسام الدائرة بتحليل كيف يمكن أن تكتسب عجلة ما طاقة حركتها .

يمثل الشكل 2–8 عجلة ساكنة فى البداية ، ولكنها تستطيع الدوران بحرية حول محور دورانها الذى يمر بمركزها . عندما تؤثر قوة شد **F** على الخيط الملفوف على حافة العجلة سوف تبدأ العجلة فى الدوران . فى هذه الحالة يعطى الشغل المبذول بواسطة القوة أثناء شد الخيط مسافة قدرها s بالمعادلة :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة } \mathbf{F} = Fs$$

وبدوران العجلة زاوية قدرها θ ينفك من الخيط طول قدره s ، حيث تمثل العلاقة بين s و θ بالمعادلة $s = r\theta$ (المعادلة 7–1) . وبالتعويض عن s بهذه القيمة نصل إلى التعبير الآتى للشغل المبذول :

$$\text{الشغل المبذول بواسطة } \mathbf{F} = Fr\theta$$

يمكننا فهم هذه العلاقة بصورة أفضل بملاحظة أن Fr هى « القوة مضروبة فى ذراع الرافعة » فى الشكل 2–8 ، وهذه الكمية ببساطة هى عزم الدوران τ المؤثر على العجلة* . ومن ثم نجد أن العلاقة بين الشغل المبذول على العجلة عندما تدور زاوية قدرها θ وعزم الدوران المؤثر عليها هى :

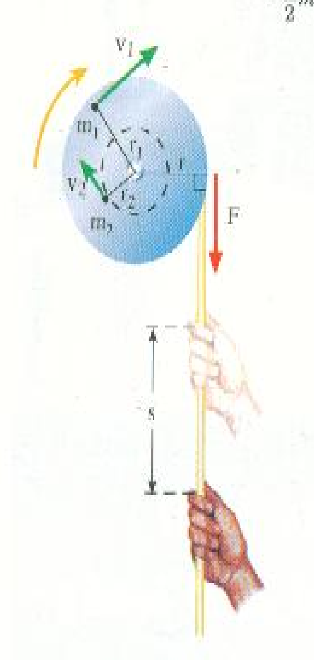
$$W = \tau\theta \qquad (8\text{–}1)$$

من المهم ملاحظة أن هذه هى النتيجة التى يمكن التوصل إليها تخمينًا بالتناظر مع الحركة الخطية . ففى حالة الحركة الخطية نجد أن $W = F_x x$ ، أما فى حالة الدوران فإن القوة تستبدل بعزم الدوران ، كما أن المسافة الخطية تستبدل بالمسافة الزاوية وعليه فإن $F_x x$ فى الحركة الدورانية تصبح $\tau\theta$ فى الحركة الدورانية ، كما أثبتنا فى المعادلة (1–8) .

طبقًا لنظرية الشغل والطاقة يجب أن يظهر الشغل المبذول بواسطة صافى القوة على العجلة فى صورة طاقة حركة . وسوف تسمى طاقة حركة جسم دائر **بطاقة الحركة الدورانية** KE_{rot} . وربما تذكر أن طاقة حركة جسم بسبب حركته الخطية هى $\frac{1}{2}mv^2$ ، وسوف يشار إلى هذه الطاقة فيما بعد باسم طاقة الحركة الانتقالية KE_{trans} . لنحاول الآن حساب طاقة حركة جسم دائر بالاستعانة بطاقة حركة كل من كتل الأجزاء الصغيرة المكونة للجسم .

لنعد مرة أخرى إلى الشكل 1–8 . عندما تدور العجلة تكتسب كل كتلة دقيقة (مثل m_1) من الكتل المماثلة الكثيرة المكونة للجسم طاقة حركة انتقالية ، وهذه تكون $\frac{1}{2}m_1v_1^2$ للكتلة m_1 . وإذا اعتبرنا أن العجلة تتكون من عدد قدره N من الكتل الدقيقة m_1 ، m_2 ، m_3 ، . . . ، m_N المكونة للعجلة فإن طاقة حركتها الكلية تكون :

شكل 1–8 :
تدور هذه العجلة فى اتجاه دوران عقارب الساعة (السهم الذهبى) وبدوران العجلة يكتسب كل جزء صغير من كتلتها بعض KE . وطاقة حركة m_1 مثلا تساوى $\frac{1}{2}m_1v_1^2$.



شكل 2–8 :
عندما تبذل القوة **F** شغلا بشد الخيط مسافة s تكتسب العجلة طاقة حركة قدرها Fs .

* قد يفيدك مراجعة مفهوم عزم الدوران فى القسم 4–2 .

$$\text{طاقة حركة العجلة} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}m_3v_3^2 + ... + \frac{1}{2}m_Nv_N^2$$

ولكن m_1 مثلاً تتحرك في دائرة نصف قطرها r_1 ، وتكون سرعتها الماسية على هذه الدائرة v_1 . وحيث أن السرعة الزاوية للعجلة ترتبط بهذه السرعة الماسية طبقًا للمعادلة $v_1 = \omega r_1$ ، فإن :

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_1\omega^2r_1^2$$

وبالمثل يمكننا استنتاج تعبيرات مشابهة لجميع الكتل الدقيقة الأخرى . إذن ، بالتعويض عن هذه القيم في معادلة طاقة الحركة نحصل على :

$$\text{طاقة حركة العجلة} = \frac{1}{2}m_1r_1^2\omega^2 + \frac{1}{2}m_2r_2^2\omega^2 + ... + \frac{1}{2}m_Nr_N^2\omega^2$$

وحيث أن كل أجزاء العجلة تتحرك جميعها بنفس السرعة الزاوية ω ، يمكننا إذن كتابة المعادلة السابقة على الصورة :

$$\text{طاقة حركة العجلة} = \frac{1}{2}\omega^2(m_1r_1^2 + m_1r_2^2 + ... + m_Nr_N^2)$$

المقدار بين القوسين في العلاقة السابقة يسمى **عزم القصور الذاتي** للجسم الدائر ويرمز له عادة بالرمز I :

$$I = \text{عزم القصور الذاتي} = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + ... + m_Nr_N^2 \qquad (8\text{–}2)$$

لاحظ أن وحدات I في النظام SI هي $kg.m^2$.

سوف نناقش عزم القصور الذاتي بعد قليل ؛ وعندئذ سنرى أنه حقيقة مقياس للقصور الذاتي للعجلة . ومع ذلك يمكننا أن نرى حتى في هذه اللحظة أنه يعتمد ليس فقط على كمية المادة m في الجسم ، **بل إنه يعتمد أيضًا على كيفية توزيع تلك المادة** .

الآن يمكن كتابة تعبيرنا لطاقة حركة العجلة الدائرة بدلالة I :

$$KE_{rot} = \text{طاقة الحركة الدورانية} = \frac{1}{2}I\omega^2 \qquad (8\text{–}3)$$

هذه هي طاقة حركة الجسم التي يكتسبها بسبب دورانه . لاحظ مرة ثانية أنه كان بإمكاننا تخمين الصورة العامة لطاقة الحركة الدورانية . وبالتماثل مع الكمية $\frac{1}{2}mv^2$ فإن السرعة الخطية v قد استبدلت بالسرعة الدورانية ω وأن I هي المقابل الدوراني للكتلة m .

سبق لنا التنويه إلى أن الطاقة الدورانية مرتبطة بالشغل المبذول على العجلة بواسطة عزم الدوران المؤثر عليها . ولكي نكون أكثر تحديدًا ، لنفرض أن العجلة دائرة بسرعة مقدارها ω_0 ثم أثرنا عليها فجأة بعزم دوران معين τ_0 . لنفرض أن تأثير عزم الدوران قد استمر أثناء دوران العجلة بزاوية θ (بحيث كان الشغل المبذول بواسطة عزم الدوران $\tau\theta$) ثم أزيل عنها ، وأن السرعة الزاوية للعجلة في تلك اللحظة ω_f . بتطبيق نظرية الشغل والطاقة على هذا الموقف نجد أن :

التغير فى KE للعجلة = الشغل المبذول على العجلة

$$\tau\theta = \frac{1}{2}I\omega_f^2 - \frac{1}{2}I\omega_0^2$$

$$\tau\theta = \frac{1}{2}I\left(\omega_f^2 - \omega_0^2\right)$$

حيث استخدمنا المعادلة (8-1) للتعبير عن طاقة الحركة الدورانية للعجلة .

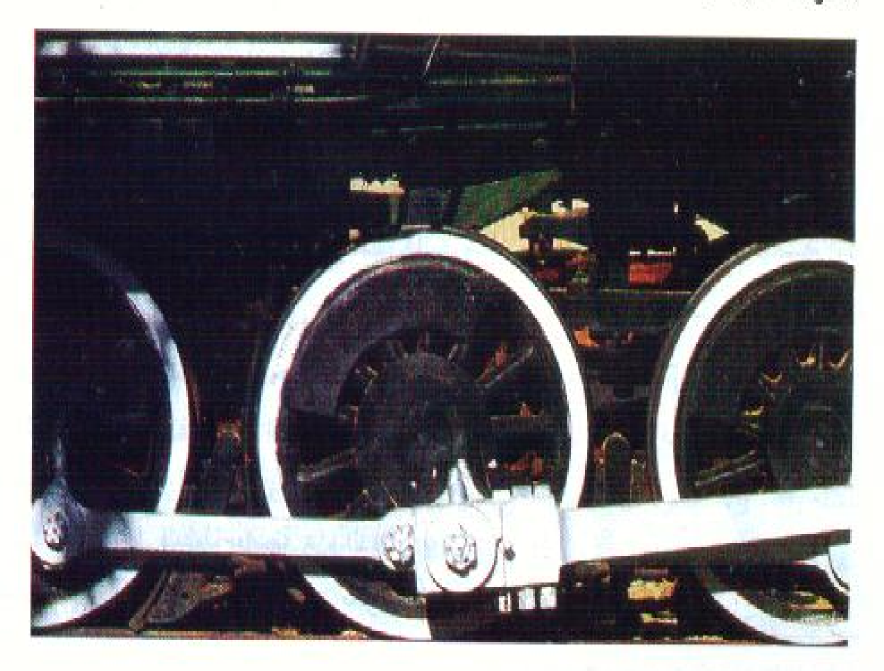
يمكن تبسيط هذه العلاقة بين الشغل وطاقة الحركة الدورانية باستخدام معادلة الحركة الزاوية (المعادلة 5-7د) : $\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$. وبالتعويض عن هذه الكمية فى معادلة الشغل والطاقة السابقة واختصار θ نحصل على :

$$\tau = I\alpha \qquad (8\text{-}4)$$

حيث α هى العجلة الزاوية مقدرة بالزوايا نصف القطرية لكل ثانية مربعة . (لماذا ؟) بهذه الطريقة أمكننا الوصول إلى علاقة بين العجلة الزاوية لحركة العجلة وعزم الدوران المسبب لهذه العجلة . هذه المعادلة للحركة الدورانية تناظر المعادلة $F = ma$ فى حالة الحركة الخطية .

8-2 القصور الذاتى الدورانى

من المعلوم أن الأجسام المتحركة حركة دورانية لها قصور ذاتى . فبعد إطفاء موتور المروحة الكهربائية يلاحظ أن سرعة دوران الريش تقل تدريجيًا بسبب قوى الاحتكاك الهوائى والاحتكاك فى محامل محور الدوران إلى أن تصل المروحة إلى السكون . ويعتبر عزم القصور الذاتى I لريشة المروحة مقياسًا لقصورها الذاتى الدورانى وهذا ما يمكن فهمه بالطريقة الآتية .



توصل أذرع إطارة القاطرة البخارية إلى العجلات المقودة عند نقط بعيدة عن المركز . بهذه الطريقة تخلق القوة المؤثرة بواسطة المكبس عزم دوران حول محور العجلات .

في الحركة الخطية يمثل القصور الذاتي لجسم ما بكتلته . ومن العلاقة $F = ma$ نجد أن :

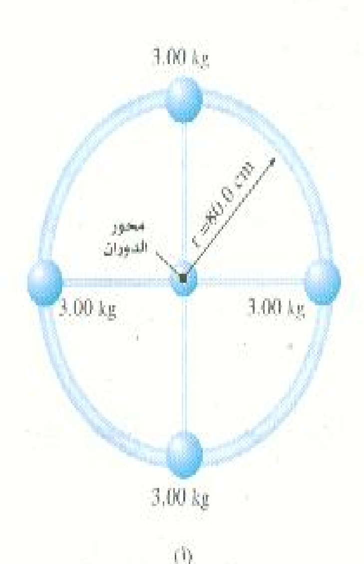
$$m = \frac{F}{a}$$

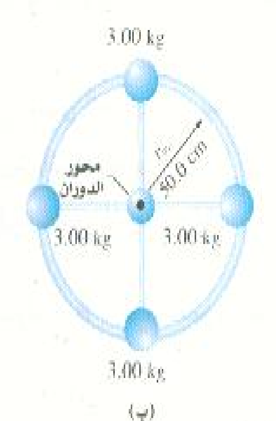
وعليه فإن الكتلة تخبرنا عن مقدار القوة اللازمة لتوليد عجلة خطية قدرها $a = 1\ m/s^2$. أي أنه كلما كان القصور الذاتي للجسم كبيرًا كلما زادت كتلته وكلما زادت القوة اللازمة لإعطائه عجلة قدرها $1\ m/s^2$.

بالمثل : فإن النظير الدوراني للمعادلة $F = ma$ ، أي المعادلة $\tau = I\alpha$ ، تعطينا معلومات مشابهة عن عزم القصور الذاتي للجسم I:

$$I = \frac{\tau}{\alpha}$$

أي أن عزم القصور الذاتي I يمثل مقدار عزم الدوران الذي يكسب الجسم عجلة زاوية قدرها $\alpha = 1\ rad/s^2$. فالأجسام ذات القيم الكبيرة للكمية I تحتاج إلى عزوم دوران كبيرة لتغيير معدل دورانها . من الواضح إذن أن I مقياس للقصور الذاتي الدوراني لأي جسم .





شكل 3-8 :
أي العجلتين أكثر صعوبة في وضعها في حالة حركة دورانية ؟

لنفحص الآن التمثيل الرياضي لعزم القصور الذاتي . من المعادلة (2-8) :

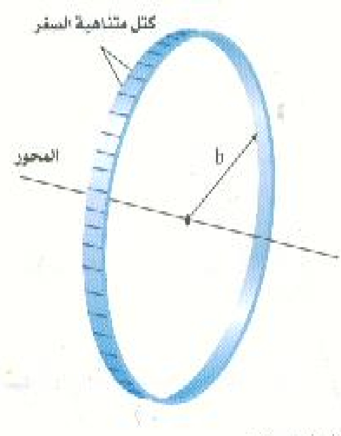
$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + ... + m_N r_N^2 = \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2$$

سنقوم الآن بتطبيق هذه العلاقة على العجلتين الموضحتين بالشكل 3-8 . تتكون كل من هاتين العجلتين من أربع كتل مركبة على إطار دائري مهمل الكتلة . إذن بالنسبة للجزء (أ) :

$$I_a = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_4 r_4^2$$
$$= (3.00\ kg)(0.800\ m)^2 + (3.00\ kg)(0.800\ m)^2 + (3.00\ kg)(0.800\ m)^2 +$$
$$(3\ kg)(0.800\ m)^2 +$$
$$= 7.68\ kg.m^2$$

بالنسبة للجزء (ب) :

$$I_b = (3.00\ kg)(0.500\ m)^2 + (3.00)(0.500\ m)^2 + (3.00\ kg)(0.500\ m)^2$$
$$+ (3.00\ kg)(0.500\ m)^2$$
$$= 3.00\ kg.m^2$$



شكل 4-8 :
ما قيمة I للطوق حول المحور المبين ؟

وكما نرى فإن عزم القصور الذاتي في (ب) أصغر كثيرًا منه في (أ) . فبالرغم من أن كتلتي العجلتين متساويتان فإن عزمي قصورهما الذاتي مختلفان لأن الكتل أبعد عن محور الدوران في (أ) عنها في (ب) . ونظرًا لأن I يتناسب مع r^2 (شكل 2-8) فإن عزم القصور الذاتي يزداد كلما كانت الكتلة أبعد عن المحور . وعليه فإن عزم الدوران اللازم في (أ) أكبر منه في (ب) .

وكمثال عملى أكثر ، لنحاول حساب عـزم القصور الذاتى لطوق (أو طارة) كتلتها M كالمبين بالشكل 4-8 . وسوف يفترض أن هذا الطوق يدور حول محور عمـودى علـى مستوى الطوق ويمر بمركزه . لتحقيق ذلك سنتخيل أن الطـوق مقسـم إلى عـدد كبير من الكتل الصغيرة كما هو مبين ، وأن كل كتلة تبعد مسافة b عن محـور الـدوران . وهكـذا فإن عزم القصور الذاتى للطوق يكون :

$$I_{hoop} = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \ldots\ldots + m_N r_N^2$$
$$= m_1 b^2 + m_2 b^2 + \ldots + m_N b^2 = b^2 (m_1 + m_2 + \ldots + m_N)$$

ولكن مجموع الكتل الصغيرة المكونة للطوق هو ببساطة كتلته الكلية M . إذن :

$$I_{hoop} = b^2 M$$

ويمكن من ناحية المبدأ حساب عزم القصـور الذاتـى لأى جسـم بـهذه الطريقـة ، ولكننا نحتاج عادة إلى استخدام حساب التفاضل والتكامل لإجراء عمليـة الجمـع فـى الحـالات المختلفة . ويمثل الجدول 1-8 نتائج مثل هـذه الحسـابات لبعض الأجسـام البسـيطة . وفى بعض الحالات قد يحدث الدوران حول محاور أخرى مختلفـة ، فالأسطوانة على سبيل المثال يمكنها أن تدور حول أحد المحورين الموضحين بالجدول . وعليـه ، يجب **ذكر المحور المستخدم لكى نعرف عزم القصور الذاتى المقصود .**

جدول 1-8 : عزم القصور الذاتى لبعض الأجسام البسيطة

الجسم	المحور	I	نصف قطر التدويم k
كتلة نقطية (متحركة فى دائرة نصف قطرها r)		mr^2	r
طوق		mb^2	b
قرص مصمت (نصف قطره b)		$\frac{1}{2} mb^2$	$b/\sqrt{2}$
كرة مصمتة (نصف قطرها b)		$\frac{2}{5} mb^2$	$b/\sqrt{\frac{2}{5}}$
أسطوانة مصمتة (طولها b)		$\frac{1}{2} mb^2$	$b/\sqrt{2}$
أسطوانة رقيقة مصمتة (طولها L)		$\frac{1}{12} mL^2$	$L/\sqrt{12}$

بالرجوع إلى الجدول 1–8 يمكننا أن نرى سمة هامة أخرى لعزم القصور الذاتي I . ففي جميع الحالات يلاحظ أن I هو حاصل ضرب كتلة الجسم في مربع طول معين للجسم . فمثلا I للكرة يساوى كتلة الكرة مضروبة في $\left(\sqrt{2/5}\,b\right)^2$. وبالمثل فإن I لقرص يساوى $m\left(b/\sqrt{2}\right)^2$ ، وكذلك بالنسبة إلى الطوق $I = mb^2$. إذن ، يمكننا عمومًا كتابة :

$$I = mk^2 \qquad (8\text{–}5)$$

حيث k هو طول مميز للجسم يسمى **نصف قطر التدويم** للجسم . **ونصف قطر التدويم** لأى جسم هو نصف القطر « الفعال » الذى يتساوى عنده عزم القصور الذاتي لهذا الجسم بعزم القصور الذاتي لطوق له نفس الكتلة . فمثلا ، يتضح من الجدول 1–8 أن $k = b$ للطوق ، وهذه قيمة معقولة لأن كلاً من الكتل الصغيرة المكونة للجسم تقع على بعد قدره b من المحور . ولكن بالنسبة إلى الكرة $k = \sqrt{2/5}\,b$ لأن أبعد النقط على الكرة فقط هى التى تقع على بعد b من المحور . وكمثال آخر يمكننا أن نلاحظ فى الشكل 3–8أ أن $k = 0.800$ m . ومن ثم فإن I لهذا الجسم يكون :

$$I = mk^2 = (12.0 \text{ kg})(0.800 \text{ m})^2 = 7.68 \text{ kg.m}^2$$

وهى نفس القيمة السابقة . هذا ويحتوى الجدول 1–8 على بعض القيم النموذجية لنصف قطر التدويم k .

ويمكن تلخيص الملاحظات السابقة فى النقاط الآتية :

1 ـ الجسم الذى كتلته m له قصور ذاتى دورانى ، وتمثل هذه الكمية بعزم القصور الذاتي I . ويمكن التعبير رياضيًا عن عزم القصور الذاتي بالمعادلة $I = mk^2$ ؛ حيث k نصف قطر التدويم للجسم ، وهو يعتمد على شكل الجسم وعلى المحور الذى يحسب I حوله .

2 ـ الجسم المتحرك حركة دورانية له طاقة حركة دورانية $\text{KE}_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2$.

3 ـ عندما يؤثر عزم دوران معين τ على جسم حر الدوران يكتسب هذا الجسم عجلة زاوية : $\tau = I\alpha$.

4 ـ الشغل المبذول بواسطة عزم دوران ما خلال دوران الجسم زاوية قدرها θ هو $\tau\theta$.

نظرية المحور الموازى

فى الجدول 1–8 حسبت عزوم القصور الذاتى للأجسام حول محاور تمر بمراكز كتل هذه الأجسام . وهناك نظرية بسيطة نافعة جدا لحساب عزم القصور الذاتى لنفس هذه الأجسام حول أى محور آخر مواز للمحور المار بمركز الكتلة . هذه النظرية معروفة باسم **نظرية المحور الموازى** ، وسوف نذكرها فيما يلى بدون برهان :

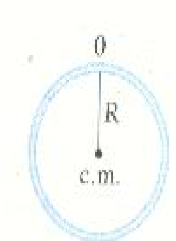
عزم القصور الذاتى لجسم حول محور O يوازى المحور المار بمركز كتلة الجسم هو :

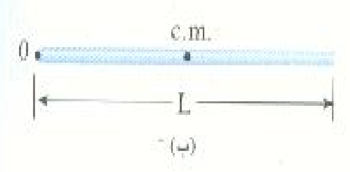
$$I_o = I_c + Md^2 \qquad (8\text{–}5)$$

حيث I_c يساوى عزم القصور الذاتى حول المحور المار بمركز كتلة الجسم ، M تساوى كتلة الجسم ، d المسافة بين المحوريين المتوازيين .

مثال توضيحى 1-8

عين عزم القصور الذاتى (أ) لطوق نصف قطره R حول محور عمودى على مستوى الطوق ويمر بنقطة على حافته (شكل 5-8أ) ، (ب) لقضيب مصمت دقيق طوله L حول محور يمر بأحد طرفيه وعمودى على طوله (شكل 5-8ب) . افترض أن كتلة كل من الجسمين M .





شكل 5-8 :
(أ) طوق كتلته M ونصف قطره R .
(ب) قضيب رقيق كتلته M وطوله L . ما مقدار عزم القصور الذاتى لكل منهما حول محور عمودى على الصفحة ويمر بالنقطة O ؟

استدلال منطقى :

(أ) المحور O فى الشكل 5-8أ يبعد مسافة قدرها $d = R$ عن المحور المار بمركز كتلة الطوق . ومن الجدول 1-8 نجد أن $I_c = MR^2$. إذن بتطبيق نظرية المحور الموازى :

$$I_o = I_c + Md^2 = MR^2 + MR^2 = 2MR^2$$

(ب) يلاحظ من الشكل 5-8ب أن المحور O يقع على بعد قدره $L/2$ عن المحور المار بمركز الكتلة . وبالرجوع إلى الجدول 1-8 نجد أن $I_c = \frac{1}{12}ML^2$. وعليه ، باستخدام نظرية المحور الموازى نحصل على :

$$I_o = \frac{1}{12}ML^2 + M(L/2)^2 = ML^2\left(\frac{1}{12}+\frac{1}{4}\right) = \frac{1}{3}ML^2$$

تمرين : عين عزم القصور الذاتى لقرص مصمت نصف قطره R وكتلته M حول محور عمودى على مستوى القرص ويمر بنقطة على حافته . **الإجابة :** $\frac{3}{2}MR^2$.

مثال 1-8

أوجد طاقة الحركة الدورانية للأرض نتيجة لدورانها اليومى حول محورها . افترض أن الأرض كرة منتظمة ، وأن : $m = 5.98 \times 10^{24}$ kg ، $r = 6.37 \times 10^6$ m .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى المعلومات اللازمة لحساب KE_{rot} ؟

الإجابة : عزم القصور الذاتى للجسم وسرعته الزاوية . $KE_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2$.

سؤال : ما قيمة عزم القصور الذاتى للكرة ؟

الإجابة : بالرجوع إلى الجدول 1-8 نجد أن : $I = \frac{2}{5}MR^2$

سؤال : كيف يمكن إيجاد السرعة الزاوية للأرض ؟

الإجابة : نعلم أن الأرض تدور 1 rev كل 24 h .

سؤال : هل من الضرورى تحويل هذه الكمية إلى وحدات أخرى ؟

الإجابة : نعم ، يجب أن يعبر عن ω بالزوايا نصف القطرية فى الثانية .

الحل والمناقشة : بتحويل وحدات السرعة الزاوية إلى الوحدات القياسية نحصل على :

$$\omega = (1.00\ \text{rev/day})(1.00\ \text{day}/24.0\ \text{h})(1.00\ \text{h}/3600\ \text{s})(2\pi\ \text{rad/rev})$$

$$= 7.27 \times 10^{-5}\ \text{rad/s}$$

(الخصائص الفيزيائية المميزة للأرض موجودة داخل الغلاف الأمامى للكتاب) . بذلك يكون عزم القصور الذاتى للأرض :

$$I = \frac{2}{5}(5.98 \times 10^{24}\ \text{kg})(6.37 \times 10^{6}\ \text{m})^2 = 9.71 \times 10^{37}\ \text{kg.m}^2$$

وأخيرًا ، الطاقة الدورانية هى :

$$KE_{rot} = \frac{1}{2}(9.71 \times 10^{37}\ \text{kg/m}^2)(7.27 \times 10^{-5}\ \text{rad/s})^2$$

$$= 2.56 \times 10^{29}\ \text{J}$$

تأكد من فهمك أن وحدات الشغل الناتجة هى الجول .

مثال 2 - 8

عجلة معينة نصف قطرها 40 cm وكتلتها 30 kg ونصف قطر التدويم لها 25 cm . يستخدم حبل ملفوف على حافة العجلة لإمدادها بقوة مماسية مقدارها 1.8 N ، وبذلك يمكن أن تدور العجلة بحرية حول محور مار بمركزها . (انظر الشكل 2-8 مثلاً) . أوجد العجلة الزاوية لهذه العجلة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى تتعين به العجلة الزاوية ؟

الإجابة : صافى عزم الدوران المؤثر على الجسم وعزم القصور الذاتى للجسم ، وذلك طبقًا للمعادلة 4-8 .

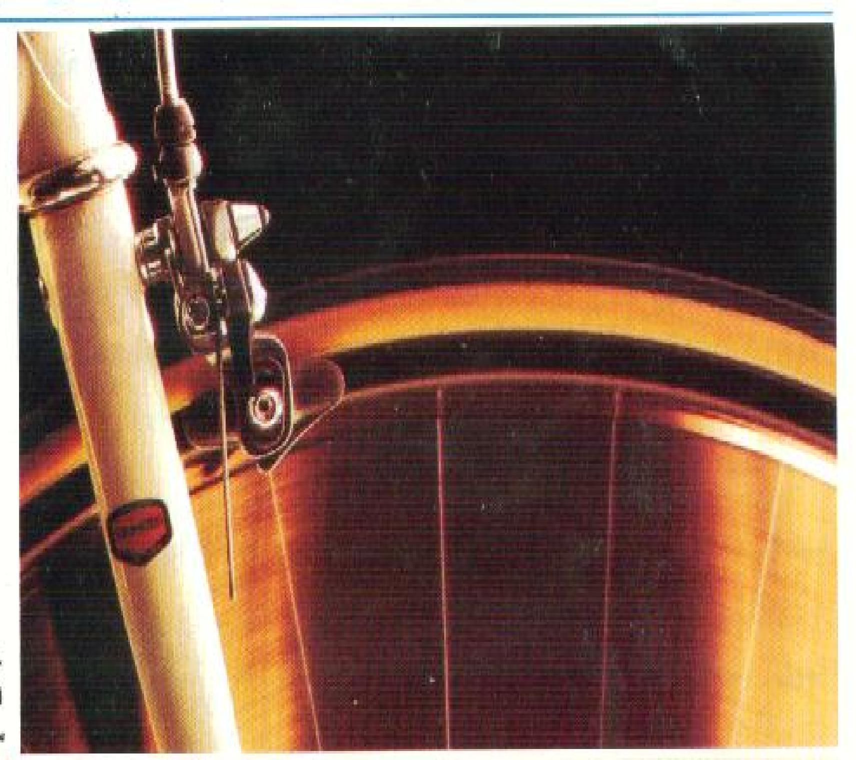
سؤال : هل المعطيات كافية لحساب صافى عزم الدوران ؟

الإجابة : نعم . توجد قوة واحدة فقط ، وهى القوة المماسية المؤثرة على بعد 40 cm من المحور . إذن :

$$\tau = (1.8\ \text{N})(0.40\ \text{m}) = 0.72\ \text{N.m}$$

سؤال : أليس من الضرورى معرفة شكل العجلة حتى يمكن إيجاد عزم القصور الذاتى لها ؟

الإجابة: ما دام نصف قطر التدويم للجسم معلومًا يمكننا مباشرة استخدام العلاقة :



عندما ينضغط فكا الفرملة تؤثر علـى حافـة العجلة قوة ممـاسية ينتج عنها عجلة زاويــة سالبة .

$I = mk^2$.

سؤال : ما هى المعادلة المستخدمة لتعيين α ؟

الإجابة : المعادلة (4-8) : $\alpha = \frac{T}{I}$

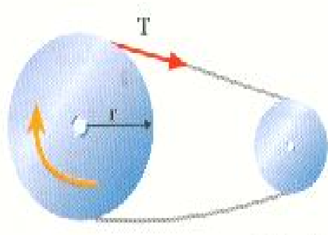
الحل والمناقشة : حساب I :

$$I = (30\ \text{kg})\ (0.25\ \text{m})^2 = 1.9\ \text{kg.m}^2$$

إذن :

$$\alpha = 0.72\ \text{N.m}/(1.9\ \text{kg.m}^2) = 0.38\ /\ \text{s}^2$$

استخدمت الوحدات بهذه الطريقة لتوضيح أن الزوايا نصف القطرية لا تظهر أوتوماتيكيًا فى الوحدات المشتقة . من المهم أن تفهم أن الوحدات rad/s^2 موجودة ضمنيًا فى الإجابة .



شكل 6-8 :
تنقل العجلة الزاوية إلى العجلة الكبيرة عن طريق عزم الدوران الناتج عن الشد T فى الجزء العلوى من السير . لاحظ أن الجزء السفلى من السير مرتخ .

مثال 3-8

يمثل الشكل 6-8 عجلة كبيرة كتلتها 80 kg ونصف قطرها r يساوى 25 cm . هذه العجلة تدار بالاستعانة بالسير الموضح ، حيث يكون الشد فى الجزء العلوى من السير 8.0 N وصفرًا أساسًا فى الجزء السفلى . (أ) ما الزمن اللازم لكى يسبب السير تسارع العجلة الكبيرة من السكون إلى سرعة مقدارها 2.0 rev/s ؟ (ب) ما هى المسافة التى تدورها العجلة خلال هذا الزمن ؟ (جـ) ما قيمة الشغل المبذول بواسطة السير على العجلة ؟ اعتبر أن العجلة قرص منتظم .

ا

استدلال منطقى الجزء (أ)

سؤال : ما هى المعادلة التى تمثل العلاقة بين الزمن والتغير فى السرعة الزاوية ؟

الإجابة : إذا كانت العجلة الزاوية ثابتة ، هذه المعادلة هى :

(المعادلة 7-5ب) $$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

حيث $\omega_0 = 0$ فى هذه الحالة .

سؤال : هل المعلومات المعطاة كافية لحساب α ؟

الإجابة : يمكن استخدام المعادلة 8-4 إذا عُلم عزم القصور الذاتى وصافى عزم الدوران . هاتان الكميتان يمكن حسابهما بمعلومية كتلة ونصف قطر العجلة والشد المؤثر مماسيًا بواسطة السير على محيط العجلة ، وهى جميعًا معطاة فى نص المسألة ، بالإضافة إلى الإشارة إلى أنه بالإمكان اعتبار العجلة قرصًا منتظمًا .

سؤال : ما قيمة عزم القصور الذاتى للقرص بدلالة كتلته M ونصف قطره R ؟

الإجابة : من الجدول 8-1 نجد أن عزم القصور الذاتى للقرص يعطى بالعلاقة :

$$I = \frac{1}{2} MR^2$$

الحل والمناقشة : عزم القصور الذاتى هو :

$$I = \frac{1}{2}(80\ \text{kg})(0.25\ \text{m})^2 = 2.5\ \text{kg.m}^2$$

عزم الدوران حول المحور هو :

$$\tau = \text{القوة} \times \text{ذراع الرافعة} = (8.0\ \text{N})(0.25\ \text{m}) = 2.0\ \text{N.m}$$

وعليه ، فإن العجلة الزاوية تكون :

$$\alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{2.0\ \text{N.m}}{2.5\ \text{kg.m}^2} = 0.80\ \text{rad/s}^2$$

ومن ثم فإن الزمن اللازم لتسارع العجلة إلى السرعة المطلوبة هو :

$$t = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{2(2\pi\ \text{rad/s})}{0.80\ \text{rad/s}^2} = 16\ \text{s}$$

ا

استدلال منطقى الجزء (ب)

سؤال : ما معنى « ما هى المسافة التى تدورها العجلة ؟ »

الإجابة : المعنى هو « ما قيمة الإزاحة الزاوية θ ؟ »

سؤال : ما العلاقة بين الزاوية θ والزمن t ؟

الإجابة : عندما تبدأ الحركة من السكون ($\omega_0 = 0$) تكون العلاقة على الصورة :

(المعادلة 5-7هـ) $\theta = \frac{1}{2}\alpha t^2$

الحل والمناقشة : بالتعويض بالقيم العددية السابقة في المعادلة السابقة نجد أن :

$$\theta = \frac{1}{2}(0.80\ rad/s^2)(16\ s)^2 = 99\ rad$$

استدلال منطقي الجزء (جـ)

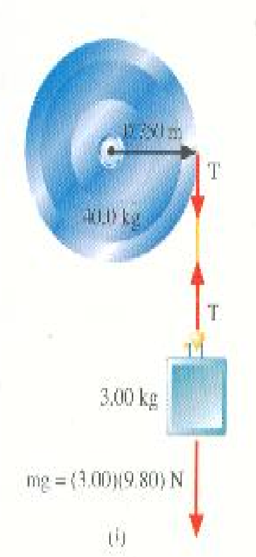
سؤال : ما تعريف الشغل في حالة الدوران ؟

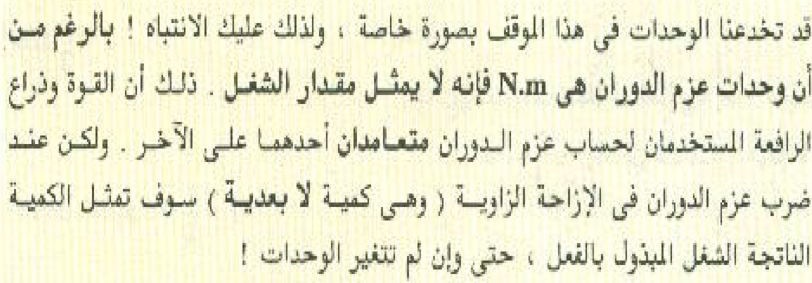
الإجابة : الإزاحة الزاوية × عزم الدوران = الشغل المبذول بواسطة عزم الدوران

(المعادلة 1-8) $W = \tau\ \theta$

الحل والمناقشة : باستخدام القيم العددية السابقة نحصل على :

$$W = (2.0\ N.m)(99\ rad) = 200\ N.m = 200\ J$$





قد تخدعنا الوحدات في هذا الموقف بصورة خاصة ، ولذلك عليك الانتباه ! **بالرغم من أن وحدات عزم الدوران هي N.m فإنه لا يمثل مقدار الشغل** . ذلك أن القوة وذراع الرافعة المستخدمان لحساب عزم الدوران **متعامدان** أحدهما على الآخر . ولكن عند ضرب عزم الدوران في الإزاحة الزاوية (وهي **كمية لا بعدية**) سوف تمثل الكمية الناتجة الشغل المبذول بالفعل ، حتى وإن لم تتغير الوحدات !

تمرين : باستخدام قيمتي I و ω ، أوجد طاقة الحركة الدورانية للعجلة .

الإجابة : 200 J .

مثال 4-8

علق قالب كتلته 3 kg في طرف حبل ملفوف على عجلة كتلتها 40 kg ونصف قطرها 0.750 m ونصف قطر التدويم لها 0.600 m كما هو مبين بالشكل 7-8أ . أوجد (أ) العجلة الزاوية للعجلة ، (ب) المسافة التي يسقطها القالب في أول 10 s بعد تحريره .

استدلال منطقي الجزء (أ)

سؤال : بماذا تتعين α ؟

الإجابة : توضح المعادلة (4-8) أن α تتعين بصافي عزم الدوران المؤثر على العجلة وعزم القصور الذاتي لها . ويوضح المخطط البياني للجسم الحر في هذه الحالة (شكل 7-8ب) إن صافي عزم الدوران ينتج من الشد في الخيط الملفوف حول العجلة .

سؤال : العجلة ليست قرصًا بسيطًا ؛ ما مقدار عزم القصور الذاتي لها ؟

الإجابة : يمكن كتابة عزم القصور الذاتي لأي جسم بمعلومية كتلته ونصف قطر التدويم

0.750 m T (ب)

T mg (جـ)

شكل 7-8 :
عندما يتسارع القالب ، وكتلته 3 kg ، تحت تأثير شد الجاذبية سوف ينقل الشد في الحبل عجلة زاوية إلى العجلة .

له على الصورة : $I = Mk^2$.

سؤال : ما هي المعادلة الممكن استخدامها لتعيين α ؟

الإجابة : قانون نيوتن الثاني في الصورة الخاصة بالحركة الدورانية :

$$\alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{rT}{Mk^2}$$

استدلال منطقي الجزء (ب)

سؤال : كيف يعين الشد ؟

الإجابة : يجب أن يؤثر طرف الخيط المتصل بالقالب عليه بشد قدره T ، لذلك يجب دراسة حركة القالب أيضًا . وهنا يوضح المخطط البياني للجسم الحر (شكل 7-8جـ) أن صافي القوة المؤثرة على القالب يساوي $mg - T$.

سؤال : ما هي المعادلة التي تنطبق على حركة القالب ؟

الإجابة : $F_{net} = mg - T = ma$.

سؤال : هل توجد ثمة علاقة بين العجلة الزاوية لحركة العجلة ، وعجلة حركة القالب إلى أسفل ؟

الإجابة : نعم . عند دوران العجلة إزاحة زاوية θ يهبط الجسم مسافة خطية $r\theta$.

إذن : $a = \alpha r$.

سؤال : كيف يمكن الربط بين معادلتي القانون الثاني ؟

الإجابة : بالتعويض عن a بالمقدار $r\alpha$ تتحول المعادلتان إلى :

$$Tr = (Mk^2)\alpha \quad \text{و} \quad mg - T = m(r\alpha)$$

وبضرب المعادلة الثانية في r ثم جمع المعادلتين سوف يختصر الشد ، ونجد أن :

$$mgr = (Mk^2 + mr^2)\alpha \quad \text{أو} \quad \alpha = \frac{mgr}{Mk^2 + mr^2}$$

الحل والمناقشة : يمكن إيجاد α مباشرة :

$$\alpha = \frac{(3.00\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(0.750\text{m})}{(40.0\ \text{kg})(0.600\ \text{m})^2 + (3.00\ \text{kg})(0.750\ \text{m})^2} = 1.37\ \text{rad/s}^2$$

وهكذا يمكن إيجاد العجلة a من العلاقة $a = r\alpha$:

$$a = (0.750\ \text{m})(1.37\ \text{rad/s}^2) = 1.03\ \text{m/s}^2$$

وأخيرًا فإن المعادلة التي تربط المسافة التي يهبطها القالب بالزمن (حيث $v_0 = 0$) هي :

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}(1.03\ \text{m/s}^2)(10.0\ \text{s})^2 = 51.5\ \text{m}$$

هذه المسافة مقاسة بالطبع إلى أسفل بالنسبة لوضع الجسم الابتدائي . وبقياس مسافة وزمن السقوط يمكن استخدام هذا التحليل لإيجاد عزم القصور الذاتي ، ومن ثم نصف

قطر التدويم للعجلة ، وهذه هى الطريقة المستخدمة الفعل على نطاق واسع لتعيين هذه الكميات .

مثال 5-8

أوجد السرعة الزاوية للعجلة فى المثال 4–8 بعد سقوط القالب مسافة قدرها 80.0 cm . استخدم علاقات الطاقة بغرض عدم وجود احتكاك .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى ينطبق على هذا الموقف ؟

الإجابة : فى غياب الاحتكاك وغياب أى قوى أخرى خلاف الجاذبية يكون مجموع طاقتى الحركة KE والوضع PE ثابتًا .

سؤال : ما علاقة السرعة الزاوية للعجلة الدائرة بطاقة حركة النظام ؟

الإجابة : طاقة الحركة الدورانية $\frac{1}{2}I\omega^2$ جزء من KE الكلية للنظام .

سؤال : ما المعادلة التى يعطيها قانون بقاء الطاقة هنا ؟

الإجابة : حيث أن النظام يبدأ الحركة من السكون ، إذن $KE_0 = 0$ ، ومنه :

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + mg\,\Delta h = 0$$

حيث $\Delta h = -80.0\ \text{cm}$.

سؤال : هل توجد علاقة بين v و ω ؟

الإجابة : نعم . عندما ينفك خيط بدون انزلاق من على محور دوران نصف قطره r تكون العلاقة بين المسافة الخطية Δh والإزاحة الزاوية المناظرة θ على الصورة $\Delta h = r\,\Delta\theta$. وينتج من ذلك أن $v = r\omega$.

سؤال : ما هى إذن المعادلة النهائية اللازم حلها بالنسبة ω ؟

الإجابة : $\frac{1}{2}(mr^2 + I)\omega^2 = mg\,\Delta h$ ، حيث $I = Mk^2$.

الحل والمناقشة : يمكن حل هذه المعادلة جبريًا بالنسبة إلى ω^2 ثم التعويض بالقيم العددية :

$$\omega^2 = 2mg\frac{\Delta h}{mr^2 + Mk^2}$$

$$= \frac{2(3.00\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(0.800\ \text{m})}{(3.00\ \text{kg})(0.750\ \text{m})^2 + (40.0\ \text{kg})(0.600\ \text{m})^2}$$

$$\omega = 1.71\ \text{rad/s}$$

حيث أن $1/2\ \omega^2$ عامل مشترك فى جزئى طاقة الحركة KE ، يلاحظ أن نسبة KE الانتقالية إلى الدورانية فى النظام عند أى لحظة تساوى $(mr^2)/(Mk^2)$.

تمرين : احسب KE الكلية للنظام وطاقة الحركة الدورانية للعجلة فى المثال السابق .

الإجابة : $KE_{rot} = 23.5\ J$ ، $KE_{rot} = 0.894(Ke_{rot}) = 21.0\ J$.

8-3 الحركة الدورانية الانتقالية المشتركة



الأسطوانات (الدحاريج) الضخمة لمعدة رصف الطرق هذه لها عزوم قصور ذاتية كبيرة جدًا . وأثناء حركة المعدة تمثل طاقة الحركة الدورانية للدحاريج الجزء الأعظم من طاقة الحركة الكلية للمعدة .

الشكل 8-8 يمثل عجلة تتدحرج بدون انزلاق . فى هذا الموقف يقوم كل جزء صغير من أجزاء العجلة بنوعين مختلفين من الحركة فى نفس الوقت . فمركز العجلة ، وهو مركز كتلة العجلة ، يتحرك أفقيًا بسرعة مقدارها $v_{c.m}$ ، كما أن العجلة تدور حول المحور العمودى المار بمركز الكتلة بسرعة مقدارها ω . وعليه فإن العجلة المتدحرجة لها طاقة حركة انتقالية وطاقة حركة دورانية .

من الممكن التعبير عن طاقة الحركة الكلية للعجلة بمنتهى السهولة عندما نقصر اهتمامنا على الدوران حول محور معين هو المحور المار بمركز كتلة العجلة ، وذلك لأن هذا هو المحور الذى يدور حوله الجسم المتدحرج عادة . فى هذه الحالة يمكننا كتابة :

طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك حركة انتقالية وحركة دورانية حول المحور المار بمركز الكتلة تساوى مجموع طاقة الحركة الانتقالية لمركز الكتلة وطاقة الحركة الدورانية حول المحور المار بمركز الكتلة :



$$KE_{tot} = \frac{1}{2}Mv^2_{c.m.} + \frac{1}{2}I_c\,\omega^2$$

حيث M كتلة الجسم ، $v_{c.m.}$ سرعة كتلة الجسم ، I_c عزم القصور الذاتى حول المحور المار بمركز الكتلة .

سنوضح الآن كيف تستخدم هذه الحقيقة عن KE فى حل المسائل التى تتضمن KE_{tot} و KE_{rot} فى نفس الوقت .



شكل 8-8 :
عند دوران العجلة يكون لها طاقة حركة انتقالية وطاقة حركة دورانية .

مثال 8-6

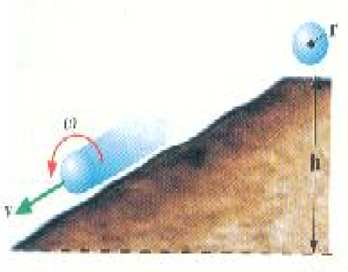
تبدأ كرة منتظمة نصف قطرها r وكتلتها m فى التدحرج من السكون من قمة مستوى مائل ارتفاعه h (شكل 8-9) . بأى سرعة تتحرك الكرة عند وصولها إلى القاع ؟ (افترض أن التدحرج أملس وأن فواقد الطاقة بالاحتكاك مهملة) .

استدلال منطقى :

سؤال : ما المبدأ الذى ينطبق على هذا الموقف بصورة مباشرة ؟

الإجابة : مبدأ بقاء الطاقة الميكانيكية .

سؤال : ما قيمة كل من PE الابتدائية والنهائية ؟



شكل 9–8 :
عندما تتدحرج الكرة إلى قاع المستوى المائل تتحول طاقة جهدها التثاقلي (طاقة الوضع) إلى طاقة حركة انتقالية وطاقة حركة دورانية .

الإجابة : باختيار قاع المستوى المائل كمستوى إسناد نجد أن $PE_0 = mgh$ و $PE_f = 0$.

سؤال : ما قيمة KE الابتدائية والنهائية ؟

الإجابة : $KE_f = \frac{1}{2}mv^2_{c.m.} + \frac{1}{2}I_c\,\omega^2$ ، $KE_0 = 0$

سؤال : ما قيمة I_c ؟

الإجابة : من الجدول 1–8 نجد أن $I_c = \frac{2}{5}mr^2$ للكرة .

سؤال : هل يوجد أي ارتباط بين $v_{c.m.}$ و ω ؟

الإجابة : طالما كانت الكرة **متدحرجة بدون انزلاق** : $v_{c.m} = r\omega$ (المعادلة 7–7) . هذا لا يكون صحيحًا إذا لم يتحقق هذا الشرط .

سؤال : ما المعادلة التى نحصل عليها من قانون بقاء الطاقة ؟

الإجابة : حيث أن الطاقة الابتدائية للكرة كلها PE فإن طاقتها النهائية عند الوصول إلى القاع تكون كلها KE ، وبذلك يمكن كتابة $PE_i = KE_f$. وباستخدام العلاقة $v_{c.m.}/r = \omega$ سنجد أن :

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2_{c.m.} + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}\right)(mr^2)\left(\frac{v_{c.m}}{r}\right)^2$$

الحل والمناقشة : لاحظ أن نصف قطر الكرة r يختصر فى الحد الأخير . وإذا اعتبرنا أن I_c يعطى بالكمية mk^2 ببساطة فإن ذلك لن يكون صحيحًا بالطبع . لاحظ كذلك أن m تختصر من كل الحدود . والآن ، بحل المعادلة السابقة جبريًا بالنسبة إلى $v_{c.m.}$ نحصل على :

$$v^2_{c.m.} = \frac{2gh}{1+\frac{2}{5}} = \frac{10}{7}gh$$

عند فحص المقام فى التعبير الأوسط سنرى أن الحد الثانى ، $\frac{2}{5}$ ، يمثل تأثير القصور الذاتى الدورانى ، وهذا مجموع على الحد الأول ، 1 ، الذى يمثل الحد الانتقالى . التدحرج إذن يعنى أن PE الأصلية قد قسمت بين الحركتين الدورانية والانتقالية ، بحيث يكون مقدار السرعة النهائية لمركز الكتلة أقل مما فى حالة حدوث انزلاق لا احتكاكى . ذلك أنه إذا لم تتدحرج الكرة على الإطلاق ، بل انزلقت إلى أسفل على المستوى المائل سوف يعطى مقدار سرعتها بالعلاقة $v^2_{c.m.} = 2gh$. هذه هى نفس قيمة مقدار السرعة التى حصلنا عليها فى المسائل السابقة المتعلقة بالسقوط الحر أو السقوط من ارتفاع قدره h .

مثال 7-8

افترض أن لدينا ثلاثة أجسام منتظمة لها نفس الكتلة m ونفس نصف القطر r ؛ الأول على شكل كرة والثانى عبارة عن طوق والثالث قرص مصمت . إذا بدأت هذه الأجسام الثلاثة





فى التدحرج بدون انزلاق من السكون من فوق قمة تل ارتفاعه h عن القاع ، فأى هذه الأجسام يصل أولاً إلى القاع ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما معنى « يصل أولاً إلى ارتفاع » ؟

الإجابة : كل من هذه الأجسام الثلاثة لابد أن يقطع نفس المسافة أثناء حركته إلى أسفل على سفح التل . وعليه فإن الجسم الذى يكتسب أكبر سرعة انتقالية سوف يصل أولاً إلى القاع .

سؤال : لماذا ستصل هذه الأجسام إلى القاع بسرعات مختلفة ؟

الإجابة : عندما تتدحرج الأجسام الثلاثة على التل بدون انزلاق يدور كل منها دورة كاملة أثناء حركة مركز كتلة مسافة قدرها $2\pi r$. وفى هذه الحالة سوف تتعين نسبة طاقة الوضع PE التى تظهر على صورة طاقة حركة انتقالية لمركز كتلة كل جسم بمقدار عزم القصور الذاتى له .

سؤال : ما هى المعادلة العامة التى تبين تأثير عزوم القصور الذاتى ؟

الإجابة : ارجع إلى المثال السابق وعممه .

الحل والمناقشة : بدلاً من التعويض بقيم عزوم القصور الذاتى للأجسام ، يمكن استخدام معادلة بقاء الطاقة التى تنص عمومًا على أن :

$$v^2_{\text{c.m.}} = \frac{2gh}{1+I_c/mr^2} = \frac{2gh}{1+N}$$

حيث N هو المعامل العددى فى المعادلة العامة لعزم القصور الذاتى I_c . فمثلاً N تساوى 1 للطوق ، $\frac{1}{2}$ للقرص ، $\frac{2}{5}$ للكرة .

إذن :

$$v_{\text{c.m.}}\,(\text{hoop}) = 2gh/(1+1) = gh$$

$$v_{\text{c.m.}}\,(\text{disk}) = 2gh/(1+\tfrac{1}{2}) = \tfrac{4}{3}gh = 1.33\,gh$$

$$v_{\text{c.m.}}\,(\text{sphere}) = 2gh/(1+\tfrac{2}{5}) = \tfrac{10}{7}gh = 1.43\,gh$$

من هذا نرى أن الجسم الأصغر فى I_c (الكرة) سوف يكتسب أقل KE دورانية ، ومن ثم تكون KE الانتقالية له أكبر من الآخرين . هذا الجسم إذن هو الذى يصل إلى قاع التل أولاً . ■

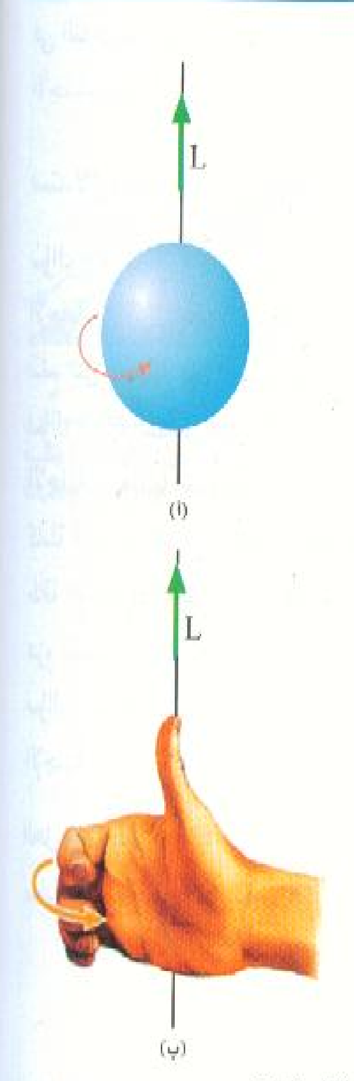
8-4 كمية التحرك الزاوى

فى ضوء التشابهات الكثيرة التى وجدناها حتى الآن بين الظواهر الخطية والدورانية لا يجب أن تدهش لوجود نظير دورانى لكمية التحرك الخطى . وترتبط كمية التحرك

الدوراني ، أو الزاوي ، بحقيقة أن الجسم الدائر يستمر في الدوران . وقد سبق أن عرفنا كمية التحرك الخطي بأنها حاصل ضرب مقدار القصور الذاتي الانتقالي m في السرعة الانتقالية $\mathbf{v}$. وحيث أن الكميتان المناظرتان في حالة الدوران هما القصور الذاتي الدوراني I والسرعة الزاوية ω ، يمكننا أن نتنبأ أن كمية التحرك الزاوي L تعطي بالعلاقة :

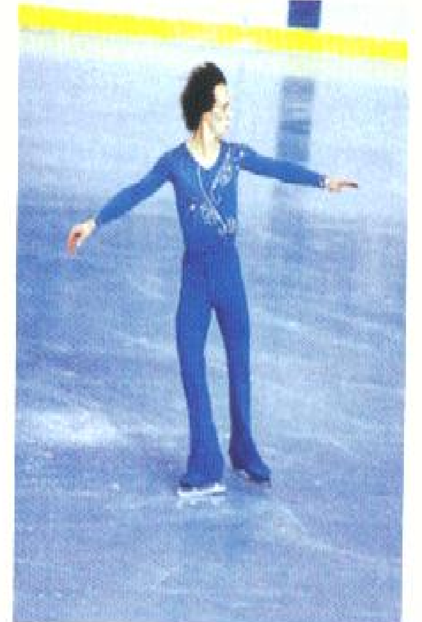
$$\mathbf{L} = \text{كمية التحرك الزاوى} = I\omega \qquad (8\text{-}6)$$

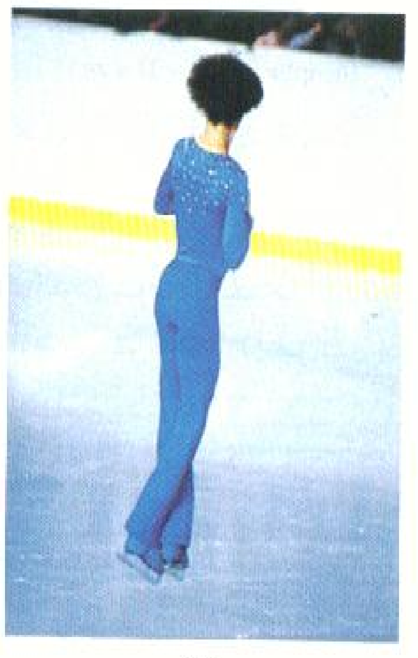
رأينا في أجزاء سابقة أن اتجاه الكميات المرتبطة بالدوران ، مثل عزم الدوران والإزاحة الزاوية والسرعة الزاوية ، يمكن وصفه بأنه إما في اتجاه دوران عقارب الساعة أو في عكس اتجاه دوران عقارب الساعة حول محور مختار ثابت . ولكن هناك طريقة أخرى أكثر مناسبة في أغلب الأحيان لوصف اتجاه الدوران وهي **أن يمثل الاتجاه بمتجه على استقامة المحور الذى يدور الجسم حوله** (شكل 10-8أ) . ويمكن توضيح العلاقة بين هذين الوصفين لاتجاه الدوران بالاستعانة بالشكل 10-8ب . وإذا قمنا بلف أصابع اليد اليمنى حول المحور في اتجاه دوران الجسم سوف يشير الإبهام إلى أحد الاتجاهين على طول محور الدوران ، وقد اتفق على أن يكون هذا الاتجاه هو اتجاه السرعة الزاوية ، وبالتالي اتجاه كمية التحرك الزاوى . وعندئذ سوف يؤدى تغيير الاتجاه من دوران في اتجاه دوران عقارب الساعة إلى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة إلى مجرد انعكاس لاتجاه الإبهام ، وهذا ما يمكن أن تتحقق منه بنفسك . هذه الطريقة لوصف اتجاهات المتجهات الدورانية على استقامة محور الدوران تسمى **قاعدة اليد اليمنى** .

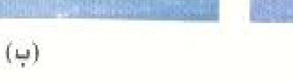


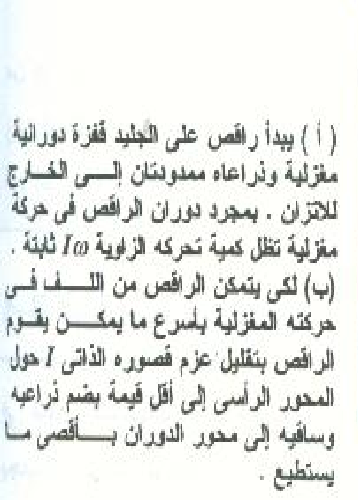
شكل 10-8 :
الكرة في الجزء (أ) تدور في الاتجاه الممثل بالسهم الذهبى . ويؤخذ اتجاها السرعة الزاوية وكمية التحرك الزاوى على استقامة محور الدوران إلى أعلى ، كما هو مبين بقاعدة اليد اليمنى فى الجزء (ب) .

تتبع كمية التحرك الزاوى قانون بقاء يشبه إلى حد كبير قانون بقاء كمية التحرك الخطي . ويمكن صياغة **قانون بقاء كمية التحرك الزاوى** كما يأتى :









(أ) يبدأ راقص على الجليد قفزة دورانية مغزلية وذراعاه ممدودتان إلى الخارج للاتزان . بمجرد دوران الراقص في حركة مغزلية تظل كمية تحركه الزاوية $I\omega$ ثابتة .
(ب) لكى يتمكن الراقص من اللف في حركته المغزلية بأسرع ما يمكن يقوم الراقص بتقليل عزم قصوره الذاتى I حول المحور الرأسى إلى أقل قيمة بضم ذراعيه وساقيه إلى محور الدوران بأقصى ما يستطيع .

تظل كمية التحرك الزاوى لجسم أو نظام من الأجسام ثابتة فى المقدار والاتجاه ما لم يؤثر على الجسم أو النظام صافى عزم دوران خارجى :

$$I\omega = \text{constant} \quad \text{عندما يكون} \quad \Sigma\tau = 0$$

لاحظ أن **اتجاه** متجه كمية التحرك الزاوى لا يتغير إذا لم يؤثر على الجسم عزم دوران غير متزن . هذا يكافئ القول أن محور دوران أى جسم يتحرك حركة مغزلية لا يغير اتجاهه ما لم يؤثر على الجسم صافى عزم دوران لا يساوى صفرًا . ويمكنك أن تتحقق من هذا بنفسك باستخدام جيروسكوب بسيط أو عجلة تدور فى حركة مغزلية سريعة (كترس المنبه مثلاً) . فمثلاً ، عندما تدور عجلة كبيرة حول محور شمالى - جنوبى لا يمكن تغيير اتجاه المحور بسهولة مالم تسلط على العجلة قوى كبيرة جدًا . وعندما يسلط عزم دوران على مثل هذا النظام فإن الحركة الناتجة سوف تمثل أهمية خاصة لأنها تبدو متعارضة مع ما يتوقع المرء حدوثه . وبالرغم من أن تحليل هذه الظواهر أكثر تعقيدا من أن نتتبعه فى هذا المقرر الدراسى ، فإن من السهل الاستدلال على هذه التأثيرات ، وقد يرى مدرسك أن يعطيك بعضًا منها .

بقاء كمية التحرك الزاوى مبدأ فيزيائى فى غاية الأهمية ، ويتجلى ذلك خصوصًا فى أى نظام يتغير عزم قصوره الذاتى من خلال تأثير بعض القوى الداخلية ، مثل نجم يتعرض للضمور أو راقص على الجليد يبدأ فى اللف فى حركة مغزلية وذراعاه ممدودتان أفقيًا ثم يقوم بضمهما إلى جسده . فحيث أن الكتلة يعاد توزيعها فى صورة أقرب إلى محور الدوران فى الحالتين ، **فإن عزم القصور الذاتى يقل** بالرغم من بقاء الكتلة ثابتة . ونظرًا لأن هذا التغير يجرى حدوثه بدون أى عزوم دوران خارجية فإن المقدار $I\omega$ يجب أن يظل ثابتًا ، وهذا يتطلب زيادة معدل الدوران المغزلى ω . وبالمثل ، عند **زيادة** عزم القصور الذاتى لابد أن تقل السرعة الزاوية فى تناسب طردى .



شكل 11-8 :
أوجد النسبة بين مقدارى سرعة التابع الأرضى عند نقطة الحضيض ، وعند نقطة الرأس .

مثال 8-8

تأمل تابعًا أرضيًا يدور فى مداره حول الأرض كما هو مبين بالشكل 11-8 . أوجد النسبة بين مقدارى سرعة التابع عند أقرب نقطة فى مساره من الأرض (نقطة الحضيض) ، وعند أبعد نقطة فى مساره من الأرض (نقطة الأوج) .

استدلال منطقى :

سؤال : ما المبدأ الذى يربط السرعتين عند هاتين النقطتين ؟

الإجابة : إذا كانت كمية التحرك الزاوية محفوظة ، إذن يمكننا مساواة كمية التحرك الزاوى ، ومن ثم السرعتين الزاويتين ، عند هاتين النقطتين . هاتان السرعتان مرتبطتان بالسرعتين الخطيتين المناظرتين .

سؤال : كيف نعلم ما إذا كانت كمية التحرك الزاوى محفوظة ؟

الإجابة : يجب البحث عما إذا كان التابع الأرضي واقعًا تحت تأثير صافي عزم دوران معين ، وهذا يستلزم تحديد محور لحساب عزم الدوران حوله .

سؤال : كيف نختار مثل هذا المحور ؟

الإجابة : تؤثر قوة جاذبية الأرض للقمر على استقامة خط يمر بالأرض . وعليه فإذا اخترنا محورًا بالأرض وعموديًا على مدار التابع الأرضي يمكن القول أن عزم الدوران الناتج عن قوة الجاذبية حول هذا المحور يساوي صفرًا ، وهكذا تكون كمية التحرك الزاوي للتابع الأرضي بالنسبة إلى هذا المحور ثابتة .

سؤال : ما هي المعادلة التي نحصل عليها من نظرية بقاء كمية التحرك الزاوي ؟

الإجابة : باستخدام الدليلين السفليين p و a كرمزين لنقطتي الحضيض والأوج على الترتيب يمكن كتابة $L_p = L_a$ أو $I_p \omega_p = I_a \omega_a$.

سؤال : ما مقدار عزم القصور الذاتي للتابع الأرضي عند نقطتي الأوج والحضيض ؟

الإجابة : إذا كان r_a ، r_p بعد نقطتي الأوج والحضيض عن الأرض ، فإن :

$$I_p = mr_p^2 \quad \text{و} \quad I_a = mr_a^2$$

حيث m كتلة التابع الأرضي .

سؤال : ما هي العلاقة بين السرعتين الزاوية والخطية عند هاتين النقطتين ؟

الإجابة : حيث أن السرعة الخطية عمودية على المسافة القطرية عند كلتا النقطتين يمكن كتابة :

$$v_a = r_a \omega_a \quad \text{و} \quad v_p = r_p \omega_p$$

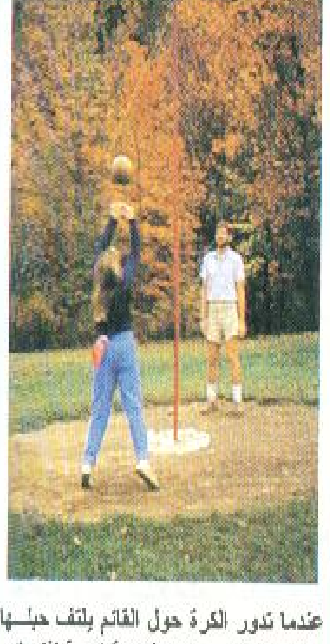
الحل والمناقشة : من نظرية بقاء كمية التحرك الزاوي نحصل على :

$$\frac{\omega_p}{\omega_a} = (r_a / r_p)^2 = \frac{v_p / r_p}{v_a / r_a}$$

إذن :

$$\frac{v_p}{v_a} = \frac{r_a}{r_p}$$

وعليه فإن سرعة التابع الأرضي تتناسب عكسيًا مع بعده عن الأرض .



عندما تدور الكرة حول القائم يلتف حبلها حوله وتزداد سرعتها الزاوية نتيجة لذلك . هل يمكنك تفسير ذلك ؟

مثال 8-9

يمثل الشكل 12-8 كأسًا نصف قطرها الداخلي 3.5 cm موضوعة على منضدة قابلة للدوران دورانًا لا احتكاكيًا بحيث يتطابق محوراهما ، وفي هذه الحالة يكون عزم القصور الذاتي للمجموعة (المنضدة والكأس) $I = 8.0 \times 10^{-4}\ kg.m^2$. أسقطت قطرات من الماء ببطئ في الكأس على استقامة المحور . فإذا كانت الكأس تدور وهي فارغة بمعدل 2.0 rpm ، فما



شكل 12-8 :
لماذا يتباطأ النظام الدائر عند إسقاط قطرات الماء ببطء في الكأس ؟

مقدار سرعتها الدورانية عندما تحتوى على 300 g من الماء .

1

استدلال منطقى :

سؤال : هل كمية التحرك الزاوى محفوظة ؟

الإجابة : نعم ، لأن الماء يدخل الكأس على استقامة محور الدوران ، وبذلك لا يمكنه أن يبذل عزم دوران على النظام الدائر .

سؤال : ما هى الخاصية التى تتغير فى هذا الموقف ؟

الإجابة : يزداد القصور الذاتى الدورانى للنظام نتيجة لزيادة الكتلة . بناء على ذلك لابد أن يقل معدل الدوران حتى تظل L ثابتة .

سؤال : ما قيمة عزم القصور الذاتى للماء ؟

الإجابة : عندما يكون معدل الدوران صغيراً ، كما هى الحال هنا ، يمكننا أن نفرض أن الماء يتخذ أساساً شكل قرص نصف قطره يساوى نصف القطر الداخلى للكأس . وعليه فإن القيمة النهائية لعزم القصور الذاتى للماء تكون :

$$I_w = \frac{1}{2}(0.30\ \text{kg})(0.035\ \text{m})^2 = 1.8 \times 10^{-4}\ \text{kg.m}^2$$

سؤال : ما هى المعادلة التى نحصل عليها بعد تطبيق مبدأ بقاء كمية التحرك الزاوى ؟

الإجابة : $I_0\, \omega_0 = (I_0 + I_w)\,\omega_f$

الحل والمناقشة : من المعادلة الأخيرة نحصل على :

$$\omega_f = \frac{\omega_0 I_0}{I_0 + I_w}$$

$$= \frac{(2.0\ \text{rpm})(8.0\times10^{-4}\ \text{kg.m}^2)}{(8.0\times10^{-4} + 1.8\times10^{-4})\text{kg.m}^2}$$

$$= 2.0\ \text{rpm}\,\frac{8.0}{9.8} = 1.6\ \text{rpm}$$

تمرين : افترض أن طاقة حركة الماء الساقط يمكن إهمالها . إثبت أن طاقة الحركة النهائية للنظام تقل بمقدار 19 فى المائة عن قيمتها الابتدائية . ماذا حدث لهذه الطاقة المفقودة ؟

8-5 وجهة نظر حديثة : أصغر مقدار من كمية التحرك الزاوى

إلى أى مدى يكون الصغير صغيراً ؟ إن مدلول أصغر أو أقل وحدة يمكن أن يتواجد فيها شىء ما مفهوم عام . لنأخذ على سبيل المثال حوض استحمام (بانيو) ملئ بالماء . يمكن تقسيم الماء فى حوض الاستحمام إلى جالونات أو مليلترات ، بل ويمكن تقسيمه

بعد ذلك إلى قطرات . ولكن عند تقسيم الماء إلى جزيئات منفردة نكون قد وصلنا إلى أصغر كمية أساسية يمكن أن يتواجد الماء فيها . أما إذا كسرنا جزئ الماء إلى مركباته من ذرات الهيدروجين والأكسجين فلن يكون لدينا ماء عند ذلك . وبالمثل فإن ذرة الأكسجين هي أصغر كمية يمكن أن يتواجد الأكسجين فيها . وكما سنرى مؤخرًا فى هذا المقرر الدراسى ، يبدو أن الشحنة الكهربائية لا يمكن أن تتواجد بمقدار أقل من الشحنة التى يحملها إلكترون أو بروتون واحد* .

ومع ذلك فليس هناك حد واضح لمدى صغر الطول والزمن ، هذا بغض النظر عن الصعوبات التى قد نواجهها فى قياس الكميات بضباطة كافية . وقد تعاملت الفيزياء الكلاسيكية طوال القرن التاسع عشر مع المسافة والزمن باعتبارهما خاصيتين قابلتين للتقسيم إلى مالانهاية ، أو**متصلتين** ، من خواص الطبيعة . ومن ثم فإننا نتحدث عن **الكتلة النقطية** ومفهوم الموضع **اللحظى** والسرعة والعجلة **اللحظيتين** ونحن نفترض ضمنيا أن الفراغ والزمن يمكن أن ينكمشا بلا حدود بدون الوصول إلى قيمة صغرى محدودة .

ويمكن إتباع نفس هذا الأسلوب المنطقى فى التفكير عند معالجة مختلف الخواص الديناميكية كالطاقة وكمية التحرك الزاوى . فبالرغم من إمكانية وجود كم أساسى للمادة ، ككتلة الجسيمات الأولية المكونة للذرة ، فإن كتلة محدودة يمكن أن تقع سرعاتها وطاقات حركتها فى مدى متصل يمتد إلى الصفر إذا أمكن لموضع والزمن أن ينكمش إلى الصفر . ولكن فى بداية القرن العشرين تبنى بعض الفيزيائين فكرة أن الخواص الميكانيكية توجد فى كميات متميزة ، وكانت هذه الفكرة إحدى الثورات المميزة لنهاية حقبة الفيزياء الكلاسيكية وبداية ما يسمى الفيزياء الحديثة .

ففى عام 1900 و 1905 اقترح الفيزيائيان الألمانيان ماكس بلانك وألبرت أينشتين كل على حدة أن انبعاث (بلانك) وامتصاص (أينشتين) الطاقة الإشعاعية (أى الضوء) بواسطة المادة يتم فى « حزم » أو « كمات » من الطاقة ، وأن طاقة الكم الواحد تتناسب مع تردد الضوء . وبهذه الفكرة تمكن بلانك من تفسير النتائج العملية الخاصة بطريقة انبعاث الضوء من الأجسام الساخنة ، كما استطاع أينشتين تفسير نتائج التجارب المتعلقة بامتصاص الضوء بواسطة الأسطح الفلزية . وهنا تجدر الإشارة إلى أن مبادئ الفيزياء الكلاسيكية كانت عاجزة تمامًا عن تفسير كل من هاتين الظاهرتين ، وهذا ما سوف يناقش تفصيلاً فى الفصل السادس والعشرين .

يعرف ثابت التناسب المستخدم فى تعريف كم الطاقة الإشعاعية فى نظرية بلانك ، h ، باسم **ثابت بلانك** . وقيمة هذا الثابت صغيرة جدًا :

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J.s}$$

* ثبت حديثا وجود جسيمات أساسية تسمى **الكواركات** (مفردها كوارك) تتنبأ النظرية بأنها تحمل شحنات قدرها ثلث وثلثا الشحنة الإلكترونية . ومع ذلك فإن هذا لا يغير حقيقة أن الشحنة لا يمكن تقسيمها إلى أقل من كم أدنى محدود ، كل ما فى الأمر أن حجم الكم قد تغير .

لاحظ أن وحدات هذا الثابت هي نفس وحدات كمية التحرك الزاوى L :

$$1 \text{ J.s} = 1 \text{ (N.m)s} = 1 \text{ (kg.m/s}^2\text{).m.s} = 1 \text{ (kg.m}^2\text{)/s}$$

من المغرى أن نرى ما إذا كانت قيمة h تمثل كمًا أساسيًا لمقدار كمية التحرك الزاوى L ، ومن ثم طاقة الحركة الدورانيـة $L^2/2I$ لجسم . بأسلوب آخر ، هل صحيح أن كمية التحرك الزاوى للجسم الدائر تساوى مضاعفًا صحيحًا ما لهذه الكمية الأساسية ؟ أى هل $L = I\omega = nh$ ، حيث $n = 1$ ، 2 ، 3 ، . . . . إلخ ؟ وأيضًا ، هل تعطى طاقة الحركة الدورانية للجسم بالعلاقة الآتية ؟

$$KE_{rot} = \frac{L^2}{2I} = \frac{(nh)^2}{2I} = n^2 \frac{h^2}{2I}$$

إذا كانت هاتان العلاقتان صحيحتين فإنهما تتنبآن بقيم غير صفرية لأصغر سرعة زاوية ممكنة h / I وأصغر KE دورانية ممكنة $h^2/2I$. وعليه فلاختبار ما إذا كانت السرعة الزاوية وطاقة الحركة الدورانية لجسم تكممية أو أنها يمكن أن تصبح صفرًا كما تتنبأ قوانين نيوتن الكلاسيكية ، يجب أن نتمكن بالتجربة من قياس الفرق بين الصفر والقيمة h / I كأصغر سرعة زاوية ، وبين الصفر والقيمة $h^2/2I$ كأصغر KE_{rot} .

بالنسبة للأجسام المادية يكون عزم القصور الذاتى كبيرًا جدًا بحيث يصبح $h^2/2I$ عددًا متناهيًا فى الصغر ، صغيرا لدرجة أنه من غير المحتمل تمييزه عن قيمة الصفر . فبتطبيق المعادلة السابقة لطاقة الحركة الدورانية KE_{rot} على مسطرة كتلتها 50 g تدور حول مركز كتلتها سنجد أن كم طاقة الحركة الدورانية يساوى 5×10^{-65} J تقريبًا وأن أصغر سرعة زاوية تساوى 1.6×10^{-31} rad/s تقريبًا . هاتان القيمتان ، من وجهة نظر القياس ، تعتبران صفرًا أساسًا ؛ وهذا يعنى فى خبرتنا أن المسطرة ساكنة . إذن ، لاختبار ما إذا كان سلوك كمية التحرك الزاوى كميًا فإن قيمة h المفرطة فى الصغر تحتم علينا اختيار أجسام ذات عزم قصور ذاتى متناه الصغر . ومن أمثلة ذلك كمية التحرك الزاوى لإلكترون أثناء دورانه حول نواة ذرة الأيدروجين والقصور الذاتى لجزيئات منفردة ثنائية الذرة مثل N_2 و H_2 .

كان الفيزيائى الدنمركى نيلز بوهر أول من قام بتطبيق فكرة تكممة كمية التحرك الزاوى على ذرة الأيدروجين فى عام 1911 وذلك لتفسير نمط انبعاث الضوء وامتصاصه بواسطة ذرة الأيدروجين . وقد افترض بوهر أن قيمة كمية التحرك الزاوى للإلكترون لابد أن تساوى مضاعفات صحيحة للكمية $h/2\pi$:

$$L \quad mr^2\omega = n\frac{h}{2\pi} \quad \text{(للإلكترون)}$$

وقد أثبت هذا الفرض الغريب والجدلى أنه مفتاح التطور التالى فى النظرية الذرية الحديثة .

وقد استخدم أينشتين الطبيعة التكممية لكمية التحرك الزاوى فى الجزيئات ثنائية الذرة فى تفسير امتصاص الحرارة بواسطة الجزيئات الغازية ، وهذا ما سوف يناقش فى الفصل الثانى عشر . كذلك شهد عام 1925 تطبيقًا ناجحًا آخر لفكرة كمية التحرك

الزاوى التكمية عندما تنبأ الفيزيائيان الهولنديان أولينبك وجودسميت أن للإلكترون نفسه حركة دورانية حول محوره ، أو مغزلية ، مقدارها $\frac{1}{2}(h/2\pi)$ ، وبهذا التنبؤ أمكن تفسير سلوك ذرات الأيدروجين عند وجودها فى مجال مغناطيسى .

من هذا نرى أن العقود الثلاثة من القرن العشرين تعتبر بداية حقبة جديدة فى تاريخ الفيزياء . وقد شهدت هذه الفترة تطوراً سريعًا فى الفكرة الثورية بأن السلوك الديناميكى للكتل الصغيرة جدا يخضع لمبدأ تكمة الطاقة الدورانية وكمية التحرك الزاوى . ويعرف هذا الفرع من الفيزياء باسم **ميكانيكا الكم** التى ثبت نجاحها فى تفسير سلوك المادة على المستوى الذرى ودون الذرى .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) طاقة الحركة الدورانية ، (ب) عزم القصور الذاتى ونصف قطر التدويم ، (د) نظرية المحور الموازى ، (هـ) كمية التحرك الزاوى .

2 ـ كتابة النظير الدورانى للعلاقات : $F = ma$ ؛ $KE_{trans} = \frac{1}{2}mv^2$ ؛ $p = mv$ ، $W = F_x x$.

3 ـ إيجاد عزم القصور الذاتى للأجسام البسيطة ، كالمعطاة بالجدول 1-8 ، حول محور مار بمركز الكتلة وحساب عزم القصور الذاتى لها حول أى محور مواز لمحور مركز الكتلة .

4 ـ استخدام العلاقة $\tau = I\alpha$ فى المواقف البسيطة المتعلقة بالحركة ذات العجلة الدورانية .

5 ـ استخدام العلاقة بين الشغل المبذول على الجسم بواسطة عزم الدوران والتغير فى طاقة حركته الدورانية فى المواقف البسيطة .

6 ـ إيجاد طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك حركة دورانية وانتقالية فى نفس الوقت .

7 ـ حل المسائل البسيطة التى تتضمن بقاء طاقة الأجسام المتدحرجة .

8 ـ كتابة نص قانون بقاء كمية التحرك الزاوى واستخدامه فى المسائل البسيطة .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

كمية التحرك الزاوى (L) :

المعادلة (8-6) $L = I\omega$ kg.m²/s أو N.s

تعريفات ومبادئ أساسية :

عزم القصور الذاتى (I):

(المعادلة 2-8) $I = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + ... + m_nr_n^2$ kg.m²

نتائج مثل هذه الحسابات لبعض الأجسام البسيطة معطاة فى الجدول 1-8 .

نصف قطر التدويم (k) :

يمكن كتابة عزم القصور الذاتي بدلالة نصف قطر التدويم للجسم على الصورة :

(المعادلة 8-5) $$I = Mk^2$$

قانون نيوتن الثاني في حالة الحركة الدورانية :

(المعادلة 8-4) $$\tau = I\alpha$$

خلاصة :

1 ـ عند استخدام هذه الصورة الدورانية لقانون نيوتن الثاني يجب أن تكون α مقدرة بالوحدات rad/s^2 .

نظرية المحور الموازى :

عزم القصور الذاتي لجسم متماسك (جاسئ) حول محور O يبعد مسافة قدرها d عن محور مركز الكتلة يساوى :

$$I_o = I_c + Md^2$$

طاقة الحركة الدورانية :

تعطى طاقة الحركة لجسم سرعته الزاوية ω وعزم قصوره الذاتي حول محور ما I بالعلاقة :

(المعادلة 8-3) $$KE_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2$$

طاقة الحركة الكلية لجسم يتحرك حركة دورانية وانتقالية في نفس الوقت تساوى :

$$KE_{tot} = \frac{1}{2}mv_{c.m.}^2 + \frac{1}{2}I_c\omega^2$$

العلاقة بين السرعة الزاوية ω والسرعة الخطية لمركز الكتلة $v_{c.m.}$ في حالة تدحرج جسم كروى منتظم نصف قطره r بدون انزلاق هي :

$$v_{c.m.} = r\omega$$

بقاء كمية التحرك الزاوى :

تظل كمية التحرك الدورانى لنظام L ثابتة ما لم يؤثر عليه صافي عزم دوران خارجي . هذا يعني أن حاصل الضرب $I\omega$ يظل ثابتًا حتى وإن تغير I أو ω أو كلاهما .

خلاصة :

1 ـ يحدث التغير في I إما لتغير الكتلة الكلية الدائرة أو تغير توزيع كتلة النظام مما يؤدى إلى تغير نصف قطر التدويم .

أسئلة وتخمينات

1 ـ ابتكر تجربة توضيحية لإثبات أن العجلة الدائرة يمكن أن تبذل شغلاً بسبب طاقة حركتها الدورانية .

2 ـ عجلتان من عجلات الدراجات متماثلتان من جميع الوجوه باستثناء أن إطار إحداهما من المطاط وإطار الأخرى على هيئة حلقة معدنية بنفس الشكل والحجم . ركبت العجلتان في محورى دوران (دنجلين) ساكنين متماثلين بحيث يمكن أن يدور كل منهما حول محوره في دوران حر نسبيًا . أى العجلتين يصل أولاً إلى السكون إذا كان مقدارا سرعتيهما الابتدائية واحدًا ؟

3 ـ ثلاث عجلات لها نفس الكتلة ونصف قطر الحافة ، ولكن العجلة a على هيئة قرص منتظم مصمت والعجلة b تتكون من حافة ثقيلة ذات برامق (أشعة) خفيفة أما العجلة c فهي عجلة سيارة عادية ذات إطار . قارن بين عزوم القصور الذاتي للعجلات الثلاث حول محاور دورانها .

4 ـ قدر عزم قصورك الذاتى وأنت واقف منتصب القامة حول (أ) محور رأسى يمر بمركز كتلة جسمك ، (ب) محور أفقى عمودى على بطنك .

5 ـ اقترح بعضهم اختزان الطاقة باستعمال حدافة ثقيلة تدور بسرعة عالية . ناقش الآراء المؤيدة والمعارضة عند تطبيق هذا الاقتراح فى (أ) سيارة ، (ب) محطة توليد الطاقة الكهربائية .

6 ـ ارجع إلى الشكل 7–8 وافترض أن الاحتكاك مهمل . (أ) الشد فى حبل التوصيل أقل من mg . لماذا ؟ (ب) ما تأثير عزم القصور الذاتى للعجلة على الشد فى الحبل .

7 ـ حشرة صغيرة تقف ساكنة على حافة منضدة دوارة تدور بدون احتكاك . ماذا يحدث للمنضدة الدوارة (أ) عندما تجرى الحشرة فى اتجاه قطرى نحو المركز ؟ (ب) عندما تجرى على الحافة فى اتجاه دوران عقارب الساعة ؟ ناقش الموقف عندما تبدأ الحشرة فى الجرى ، وعندما تجرى بسرعة ثابتة المقدار ، وعندما تتوقف تمامًا عن الحركة .

8 ـ أيهما يتدحرج بسرعة أكبر إلى أسفل على مستوى مائل ، الكرة المجوفة أم الكرة المصمتة ؟ هل يؤثر نصف قطر الكرة على مقدار السرعة ؟ كرر ذلك بالنسبة إلى طوق وقرص مصمت منتظم .

9 ـ لمنع كرة القدم أو أى مقذوف آخر من التأرجح فى المسار يجب أن يرميها الرامى بحيث تدور فى حركة مغزلية حول محور على استقامة خط الحركة . اشرح .

10 ـ قام أحد المصممين فى برنامج « اصنعها بنفسك » ببناء طائرة هليكوبتر ذات مروحة واحدة على محور رأسى . وفى الرحلة الأولى للهليكوبتر أحس الطيار بالغثيان لأن الطائرة كانت تميل دومًا إلى الدوران دورانًا مغزليًا حول محور رأسى . ما السبب فى ذلك ؟ كيف أمكن التغلب على هذه الصعوبة فى المحركات الأكثر تعقيدًا ؟

11 ـ لنفرض أن جذب الشمس للأرض قد تضاعف فجأة . ما تأثير ذلك على معدل دوران الأرض ومدارها حول الشمس ؟

مسائل

القسم 1-8

1 ـ سلطت قوة مقدارها 6 N على خيط ملفوف حول حافة عجلة نصف قطرها 9 cm . ما مقدار الشغل المبذول بواسطة هذه القوة عندما تدور العجلة زاوية مقدارها 36° ؟

2 ـ مقدار عزم الدوران الاحتكاكى فى نظام العجلة ومحور العجلة يساوى 0.060 N.m . ما مقدار الشغل المبذول بواسطة هذا المقدار من عزم الدوران عندما تدور العجلة أربع دورات كاملة ؟

3 ـ ما مقدار الشغل اللازم بذله على عجلة عزم القصور الذاتى لها $I = 0.4 kg.m^2$ حتى تتسارع العجلة من السكون إلى سرعة زاوية مقدارها 150 rev/min ؟

4 ـ بدأت عجلة خزاف عزم القصور الذاتى لها $1.5 kg.m^2$ فى التهادى إلى السكون عندما كانت سرعة حركتها الدورانية المغزلية 36 rev/min . ما مقدار الشغل الذى تبذله قوى الاحتكاك خلال فترة توقف العجلة ؟

5 ـ تلف عجلة فونوغراف عزم القصور الذاتى لها $0.0015 kg.m^2$ فى حركة مغزلية بمعدل 45 rev/min . (أ) ما مقدار الشغل الذى سوف تبذله قوى الاحتكاك لكى توقف العجلة بعد قطع التيار الكهربائى عن الفونوغراف ؟ (ب) ما مقدار متوسط عزم الدوران المؤثر بواسطة قوى الاحتكاك لكى تقل سرعة العجلة إلى السكون خلال 25 s ؟

6 ـ ما مقدار عزم الدوران اللازم لإعطاء عجلة عزم القصور الذاتى لها $0.25 kg.m^2$ عجلة زاوية قدرها $2.4 rad/s^2$ ؟

7 ـ سلط عزم دوران قدره 15 N.m على عجلة ثقيلة عزم قصورها الذاتى $20 kg.m^2$. ما قيمة العجلة الزاوية للعجلة ؟

8 ـ تعرضت عجلة عزم قصورها الذاتى $24 kg.m^2$ لعزم دوران قدره 18 N.m فى اتجاه دوران عقارب الساعة . إذا كانت العجلة

تدور في حركة مغزلية في عكس اتجاه دوران عقارب الساعة بمعدل 6 rev/min لحظة تسليط عزم الدوران عليها ، فما هو الزمن المار قبل توقف العجلة تمامًا ؟

9 - سلطت قوة مماسية قدرها 4 N على حافة عجلة نصف قطرها 16 cm فأكسبتها عجلة زاوية قدرها $0.5\ rad/s^2$. ما قيمة عزم القصور الذاتي للعجلة ؟

10 - في إحدى التجارب المعملية سلط عزم دوران قدره 0.2 N.m على ماسورة منتظمة من النحاس فسببت دورانها حول محور عمودي على طولها ويمر بمركزها بعجلة زاوية قدرها $0.45\ rad/s^2$. ما قيمة عزم القصور الذاتي للماسورة ؟

11 - تتكون دوامة الخيل في ملاهي الأطفال أساسًا من قرص أفقي منتظم كتلته 120 kg وعزم قصوره الذاتي $175\ kg.m^2$ يدور حول محور رأسي مار بمركزه . ويمكن إدارة هذا القرص بشد حبل ملفوف حول حافته بقوة مناسبة . ما مقدار القوة الأفقية التي يجب أن يؤثر بها الحبل على حافة القرص بحيث تسبب تسارعه من السكون إلى سرعة زاوية مقدارها 30 rev/min خلال 3 s ؟

12 - يدور عمود الخرج لموتور قدرته 0.3 hp بمعدل قدره 5 rev/s . (أ) ما مقدار الشغل الذي يبذله الموتور في الثانية الواحدة ؟ (ب) ما مقدار خرج عزم الدوران الذي يولده هذا الموتور عندما يعمل بهذه السرعة ؟

■ 13 - يتصل عمود الخرج لعلبة التروس بموتور قدرته المقدرة 0.2 W ، ويحمل هذا العمود عجلة عزم قصورها الذاتي $0.8\ kg.m^2$. احسب أقل زمن يستغرقه الموتور في تعجيل العجلة من السكون إلى 24 rev/min .

■ 14 - حبل ملفوف على حافة عجلة عزم قصورها الذاتي $0.1\ kg.m^2$ مركبة على محور دورانها . عندما شد الحبل مسافة قدرها 0.8 m بقوة قدرها 25 N تسارعت العجلة من السكون إلى سرعة دوران معينة . ما مقدار السرعة الزاوية النهائية للعجلة ؟

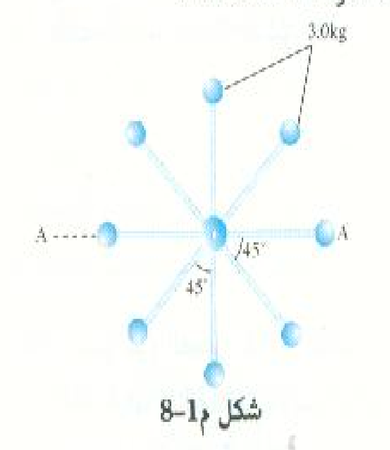
15 - تدور عجلة نصف قطرها 10 cm وعزم قصورها الذاتي $I = 0.08\ kg.m^2$ بمعدل قدره 180 rev/min تحت تأثير قوة مماسية مؤثرة على حافتها مقدارها 1.0 N . كم عدد الدورات التي تدورها العجلة قبل الوصول إلى السكون عند إيقاف تأثير القوة وهي دائرة بهذا المعدل .

16 - ما قيمة طاقة حركة قرص فونوغراف عزم قصوره الذاتي $0.012\ kg.m^2$ يدور بمعدل قدره 45 rev/min ؟

القسم 8-2

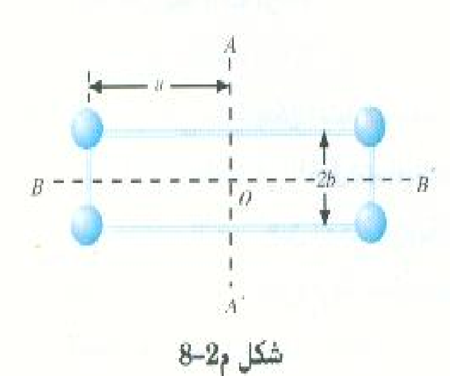
17 - ما طول الماسورة السابق وصفها في المسألة 10 إذا كانت كتلتها 0.5 kg ؟

18 - الأشعة الموضحة في الشكل م1-8 مهملة الكتلة بالنسبة إلى كتلة كل من الكرات الثمان التي تحملها (3 kg) وطول كل منها 0.5 m . أوجد عزم القصور الذاتي للنظام (أ) حول محور عمودي يمر بالمركز ، (ب) حول محور على استقامة الخط AA' .



شكل م1-8

19 - كتلة كل من الكرات الأربع المبينة بالشكل م2-8 تساوي m . إذا كانت كتلة قضبان التوصيل بين الكرات مهملة بالنسبة إلى m ، أوجد عزم القصور الذاتي للنظام (أ) حول المحور AA' ، (ب) حول المحور BB' ؛ (جـ) حول المحور O العمودي على مستوى الصفحة . اعتبر أن الكرات كتل نقطية .



شكل م2-8

20 ـ يتكون النظام المبين بالشكل م3–8 من طوقين تحملهما مجموعة من الأشعة مهملة الكتلة . فإذا كانت كتلة الطوق الداخلي m_i والخارجي m_0 ونصفا قطريهما a و b على الترتيب ، أوجد عزم القصور الذاتي للنظام حول محور مار بالمركز وعمودي على مستوى الطوقين .

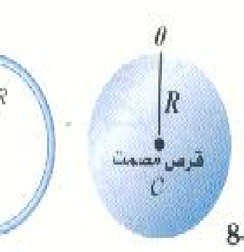
شكل م3–8

21 ـ قضيب خفيف مهمل الكتلة مثبت على استقامة أحد أقطاره طوق كتلته M ويحمل في طرفيه كتلتان متماثلتان m . أوجد عزم القصور الذاتي للنظام حول محور يمر بالمركز C وعمودي على مستوى الطوق .

22 ـ عجلة على هيئة قرص منتظم عزم قصورها الذاتي حول محور عمودي على مستواها ويمر بمركزها يساوي I_d . ركب إطار في هذه العجلة على شكل طوق نصف قطره 40 cm وكتلته 1.8 kg . أوجد عزم القصور الذاتي للمجموعة حول نفس المحور .

شكل م4–8

23 ـ عين عزم القصور الذاتي (أ) لطوق ، (ب) لقرص مصمت كتلة كل منهما M ونصف قطرهما R حول محور عمودي على مستويهما يمر بالنقطة O الواقعة على الحافة (انظر الشكل م5–8) .

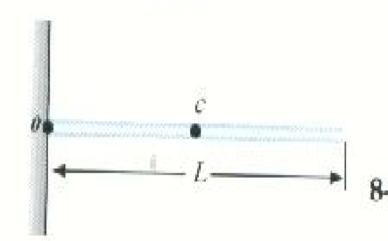


شكل م5–8

24 ـ علقت كرة كتلتها M ونصف قطرها R في خيط عديم الكتلة طوله L كما بالشكل م6–8 . عين عزم القصور الذاتي للكرة حول محور عمودي على مستوى الصفحة ويمر بنقطة التعليق O .

شكل م6–8

25 ـ عين عزم القصور الذاتي لقضيب أسطواني رفيع حول محور يمر بأحد طرفيه (النقطة O) وعمودي على طوله (انظر الشكل م7–8) . ويقع على بعد $L/3$ من O .



شكل م7–8

26 ـ يمر حبل على بكرة يمكن اعتبارها قرصًا منتظمًا كتلته 2.4 kg ونصف قطره 0.6 m . ونظرًا لوجود احتكاك بين الحبل والبكرة لم يكن الشد في الحبل متساويًا على جانبي البكرة ، حيث وجد أن القوة 150 N على أحد الجانبين و 120 N على الجانب الآخر . عين العجلة الزاوية للبكرة .

27 ـ يمكن اعتبار عجلة السيارة قرصًا مصمتًا نصف قطره 35 cm وكتلته 6.5 kg . ما مقدار طاقة الحركة الدورانية لهذه العجلة عند دورانها بمعدل 3 rev/s ؟

28 ـ ما مقدار السرعة الزاوية (بالدورات في الثانية) لعجلة أسطوانية منتظمة نصف قطرها 0.5 m وكتلتها 4 kg لـها نفس طاقة الحركة الدورانية لكرة منتظمة مصمتة تدور في حركة دورانية مغزلية ، بفرض أن الجسمين متساويان في الكتلة ونصف القطر ؟

29 ـ ما مقدار طاقة الحركة الدورانية لعجلة دراجة قطرها 60 cm وكتلتها 4.0 kg عندما تتحرك الدراجة بسرعة مقدارها 4 m/s ؟ افترض أن نصف قطر التدويم للعجلة هو $k = 50$ cm .

30 ـ عجلة معينة كتلتها 45 kg ونصف قطر التدويم لـها 30 cm . (أ) ما قيمة عزم الدوران اللازم لكي تتسارع هذه العجلة من السكون إلى 0.5 rev/s خلال 25 s ؟ (ب) ما هي المسافة التي تقطعها العجلة خلال ذلك الزمن ؟

31 ـ تدور أسطوانة مصمتة كتلتها 1.8 kg ونصف قطرها 20 cm حول محورها الهندسي بسرعة زاوية مقدارهـا 2 rev/s . ما مقدار عزم الدوران اللازم لإيقافها خلال زمن قدره 15 s ؟

32 ـ أثرت قوة مماسية مقدارها 2.2 N على حافة قرص مصمت كتلته 52 kg ونصف قطره 32 cm . (أ) ما هـو الزمن اللازم لكي يتسارع هذا القرص من السكون إلى 210 rev/min عند دورانه حول محور عمودي على مستواه ويمـر بمركـزه ؟ (ب) ما عدد الدورات التي يدورها القرص خلال هذا الزمن ؟

33 ـ بدت دوامة خيل كتلتها 100 kg ونصف قطرها 1.6 m في الدوران من السكون تحت تأثير قوة مماسية مسلطة على حافتها مقدارها 60 N . أوجد طاقة حركتها بعد مرور زمن قدره 3 s .

34 ـ ركبت أسطوانة مصمتة نصف قطرها 5.0 cm وكتلتها 6.0 kg على محور دوران (دنجل) ينطبق على محورها الـهندسي . استخدم حبل ملفوف على حافة هـذه الأسطوانة لإمدادها بقوة مماسية قدرها 3.6 N خلال زمن قدره 3 s . بفرض أن الأسطوانة قد بدأت حركتها من السكون ، (أ) ما مقدار السرعة الزاوية (بالدورات في الثانية) للأسطوانة في نهاية هذا الزمن ؟ (ب) ما قيمة طاقة حركتها في تلك اللحظة ؟

■ 35 ـ عجلة نصف قطرها 8.0 cm مركبة في محور دوران أفقي ملفوف حول حافتها خيط مهمل الكتلة يحمل ثقلاً معلقًا في طرفه الحر كتلته 60 g . بعد تحرير الثقل (من السكون) اكتسب النظام تسارعًا بحيث هبط الثقل مسافة قدرها 3 m خلال 5 s . ما قيمة عزم القصور الذاتي للعجلة ؟ ما مقدار الشد في الخيط أثناء هبوط الثقل ؟

■ 36 ـ أسطوانة نصف قطرها 24 cm في محور دوران ينطبق مع محورها الـهندسي ، ويوجد خيط ملفوف على حافـة الأسطوانة معلق فيه ثقل كتلته 100 g . بعد تحرير هذه الكتلة من السكون تسارع النظام بحيث هبطت هـذه الكتلة مسافة قدرها 180 cm خلال 1.5 s . أوجد عزم القصور الذاتي للأسطوانة والشد في الخيط أثناء هبوط الكتلة .

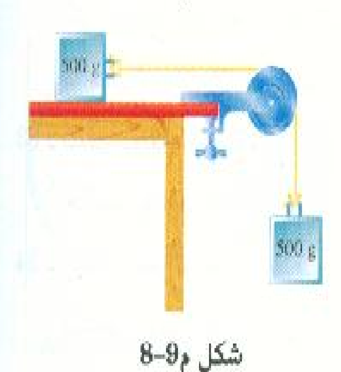
■ 37 ـ كتلة مقدارها 80 g معلقة في الطرف الحر لخيط ملفوف حول حافة عجلة قطرها 100 cm . هذه العجلـة مركبة في محور دوران لا احتكاكي وعزم القصور الذاتي لـها $I = 0.1\ kg.m^2$. تسارعت العجلة من السكون تحت تأثير هبوط الكتلة المعلقة في الخيط . (أ) ما مقدار سرعة دوران العجلة (بالدورات في الثانية) عندما تكون الكتلة قد سقطت مسافة قدرها 1.0 m ؟ (ب) ما مقدار طاقة الحركة الدورانية للعجلة في هذه اللحظة ؟

■ 38 ـ عجلة أسطوانية عزم قصورها الذاتي $I = 900\ kg.m^2$ تدور بمعدل قدره 21.0 rev/min . في لحظة معينة عشقت آلية خاصة في العجلة فأدى ذلك إلى رفع كتلة مقدارها 6.0 kg إلى أعلى أثناء تناقص سرعة الدوران إلى السكون . إلى أي ارتفاع تصل هذه الكتلة قبل سكون العجلة مباشرة ؟ إهمل أي تغير في طاقة الحركة الدورانية أثناء التعشيق .




شكل م8-8

■ 39 ـ حرر النظام المبين بالشكل م8-8 من السكون . (أ) بأى سرعة تدور العجلة اللااحتكاكية (وعزم قصورها الذاتى $I = 0.008\ kg.m^2$ ونصف قطرها $r = 8.0\ cm$) عندما تكون الكتلة 250 g قد سقطت مسافة قدرها 2.4 m ؟ (ب) ما الزمن اللازم لسقوط تلك الكتلة هذه المسافة ؟



شكل م8-9

■ 40 ـ حرر النظام المبين بالشكل م8-9 من السكون . اعتبر أن حركة القالب على المنضدة لا احتكاكية وأن عزم القصور الذاتى للعجلة اللااحتكاكية $I = 0.008\ kg.m^2$ ونصف قطرها 8.0 cm . (أ) ما مقدار سرعة الكتلة اليمنى بعد سقوطها مسافة قدرها 100 cm ؟ (ب) ما الزمن الذى تستغرقه الكتلة لقطع هذه المسافة ؟ (جـ) ما قيمة طاقة الحركة الدورانية للعجلة فى تلك اللحظة ؟

القسم 8-3

■ 41 ـ بدأ طوق نصف قطره 6 cm فى التدحرج بدون انزلاق إلى أسفل على مستوى مائل من السكون . (أ) ما مقدار سرعته الخطية عند وصوله إلى نقطة تنخفض مسافة رأسية قدرها 50 cm عن نقطة البداية ؟ (ب) بأى سرعة (بالدورات فى الثانية) يدور الطوق فى تلك اللحظة ؟

■ 42 ـ كرر حل المسألة السابقة (أ) فى حالة عجلة (قرص) نصف قطرها 6 cm ونصف قطر التدويم لـه 5 cm . (ب) فى حالة قرص منتظم نصف قطره 6 cm .

■ 43 ـ بينما كانت بلية من الصلب نصف قطرها 0.6 cm تتدحرج بدون انزلاق على منضدة بسرعة قدرها 45 cm/s وصلت إلى قاع مستوى مائل فبدأت فى التدحرج عليه إلى أعلى . إلى أى ارتفاع فوق مستوى المنضدة تصل البلية قبل أن تتوقف تمامًا ؟ إهمل فواقد الاحتكاك .

■ 44 ـ كرة مصمتة نصف قطرها 30 cm وكتلتها 80 kg . ما مقدار الشغل اللازم بذله على الكرة كى تتدحرج على سطح أفقى بسرعة زاوية مقدارها 40 rad/s ؟ (افترض أن الكرة تبدأ من السكون وأنها تتدحرج بدون انزلاق) .

■ 45 ـ تتدحرج كرة بولينج مصمتة نصف قطرها 12 cm وكتلتها 8 kg بدون انزلاق فى خط مستقيم بحارة البولينج بسرعة خطية مقدارها 1.6 m/s . ما مقدار طاقة الحركة الكلية للكرة ؟

■ 46 ـ بدأ قرص منتظم حركته من السكون من قمة مستوى مائل فوصل إلى القاع بسرعة مقدارها 12 m/s . ما ارتفاع الطرف العلوى للمستوى المائل عن القاع . افترض أن القرص يتدحرج بدون انزلاق وإهمل الاحتكاك .

■ 47 ـ بدأت كرة مصمتة كتلتها 2.2 kg ونصف قطرها 0.6 m فى التدحرج إلى أسفل على مستوى مائل يصنع زاوية قدرها 24° مع الأفقى من نقطة ترتفع بمقدار 3.2 m عن سطح الأرض . كذلك بدأ قرص وحلقة لهما نفس الكتلة ونصف القطر

كالكرة في التدحرج إلى أسفل على نفس المستوى المائل ومن نفس الارتفاع وفي نفس اللحظة . إذا كانت الأجسام الثلاثة تتدحرج بدون انزلاق ، فأيهما يصل أولاً إلى القاع ؟ وأيهما يصل أخيرًا ؟

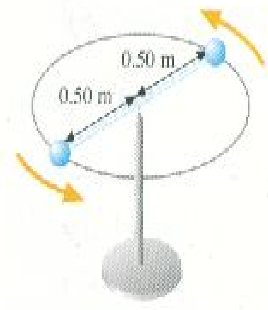
48 ـ بدأت كرة مصمتة وقرص وطوق ذات عزوم قصور ذاتية متساوية وقدرها $I = 0.05$ kg.m² في نفس اللحظة من قمة مستوى مائل يرتفع 3 m عن أرض مستوية . إذا كانت كل هذه الأجسام تتدحرج بدون انزلاق ، فأيهما يكسب السباق في الوصول إلى قاع المستوى المائل ؟

القسم 8-4

49 ـ عين مقدار كمية التحرك الزاوي لقرص مصمت منتظم نصف قطره 50 cm وكتلته 2.4 kg يتحرك حركة مغزلية بمعدل 6 rev/s حول محور عمودي على مستواه ويمر بمركزه .

50 ـ كرر المسألة السابقة في حالة كرة مصمتة لها نفس الكتلة ونصف القطر وتدور بنفس مقدار السرعة كما في المسألة 49 .

51 ـ يمثل الشكل م10-8 كرتين صغيرتين كتلة كل منهما 1.2 kg مثبتتين في طرفي قضيب معدني خفيف طوله 1.0 m ، ويدور هذا القضيب حول محور يمر بمركزه بمعدل 10 rev/s . جهزت المجموعة بآلية تستطيع تحريك الكرتين إلى الداخل تجاه محور الدوران . (أ) أوجد عزم القصور الذاتي للجهاز الأصلي . (ب) إذا حركت الكرتان فجأة حتى أصبحت كل منهما على بعد قدره 30 cm من المحور ، فما هي السرعة الجديدة للدوران ؟



شكل م10-8

52 ـ تقف امرأة في مركز منصة أفقية على هيئة قرص ، وتدور المنصة دورانًا حرًا بمعدل 2 rev/s حول محور رأسي يمر بمركزها وأيضًا خلال جسد المرأة . أمسكت المرأة كتلتين في يديها المستقيمتين وضمتهما إلى جسدها بحيث أصبح عزم القصور الذاتي للمجموعة (المنصة والمرأة والكتلتين) 1.8 kg.m² . بعدئذ قامت المرأة بفرد ذراعيها حتى تصبح الكتلتان بعيدتين عن جسدها فزاد عزم القصور الذاتي للمجموعة إلى 2.4 kg.m² . (أ) ما مقدار السرعة النهائية لدوران المنصة ؟ (ب) هل تتغير طاقة حركة النظام في هذه العملية ؟ اشرح .

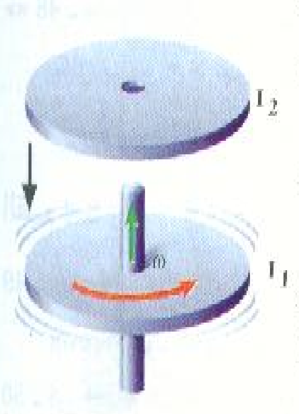
53 ـ أسطوانة فونوغراف على هيئة قرص نصف قطرها 12 cm وكتلته 0.1 kg تدور دورانًا حرًا حول محور رأسي يمر بمركزها بسرعة قدرها 45 rev/min . سقطت حشرة كتلتها 18 g على القرص في نقطة تبعد مسافة قدرها 4 cm عن مركز القرص . ما مقدار السرعة الزاوية الجديدة للقرص ؟

54 ـ في أحد عروض الرقص على الجليد قامت الراقصة بالدوران مغزليًا بسرعة زاوية مقدارها 3 rev/s عندما كان ذراعاها ممدودتان أفقيًا إلى الخارج . بعدئذ قامت الراقصة بخفض ذراعيها فنقص عزم قصورها الذاتي بمقدار 15 في المائة . أوجد (أ) السرعة الجديدة لحركتها الدورانية المغزلية . (ب) النسبة المئوية للتغير في طاقة حركتها .

55 ـ متزحلق على الجليد سرعته v_0 ، وأثناء حركته بهذه السرعة أمسك المتزحلق طرف حبل طوله L_0 مربوط في قائم ثابت . وأثناء دوران المتزحلق حول القائم كان الحبل يلتف على القائم باستمرار مما أدى إلى نقص طوله بصورة مطردة . بفرض أن المتزحلق يتحرك تلقائيًا ولا يحاول إيقاف نفسه ، ما سرعة المتزحلق عندما يكون طول الحبل (نصف قطر الدائرة) (أ) $3L_0/4$ ، (ب) $L_0/2$ ، (جـ) $L_0/3$ ؟ افترض أن نصف قطر القائم أصغر كثيرًا من L_0 .

56 ـ تتكون دوامة الخيل في ملاهي الأطفال أساسًا من قرص منتظم كتلته 150 kg ونصف قطره 6.0 m يدور حول محور رأسي مار بمركزه . وكانت سرعة دوران القرص 15 rev/min عندما كان رجل كتلته 80 kg واقفًا على الحافة الخارجية

له . (أ) بأي سرعة سوف يدور القرص عندما يتحرك الرجل مسافة قدرها 3 m تجاه المركز ؟ (ب) ما مقدار التغير في طاقة حركة النظام ؟



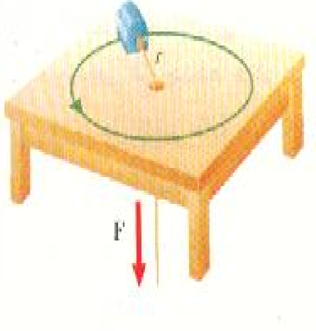
شكل م11–8

■ 57 ـ لنفرض أن دوامة الخيل في المسألة 56 كانت تدور بمعدل 12 rev/min وهي لا تحمل أي شخص على متنها . فإذا جلس شخص كتلته 80 kg فجأة على الحافة الخارجية ، فما مقدار السرعة الزاوية الجديدة لدوامة الخيل ؟

■■ 58 ـ يمثل الشكل م11–8 قرصًا بعمود دوران (عزم القصور الذاتي له I_1) يدور بسرعة زاوية مقدارها ω_0 . أسقط قرص غير دائر عزم قصوره الذاتي I_2 على القرص الأول فاقترن به . (أ) أوجد مقدار السرعة بعد التقارن . (ب) كرر المسألة عندما يكون القرص المسقط متحركًا بسرعة زاوية ابتدائية مقدارها ω_2 في نفس اتجاه ω_1 . (جـ) كرر المسألة عندما تكون $\omega_2 = \omega_1$ ولكن في اتجاهين متعاكسين . (د) ماذا يحدث لطاقة حركة النظام ؟ أوجد النسبة بين طاقتي الحركة النهائية والابتدائية للنظام .

مسائل إضافية

■■ 59 ـ تعتبر النجوم التي تزيد كتلتها عن حوالي 1.5 مرة قدر كتلة الشمس نجومًا غير مستقرة . ذلك أنها تضمر تحت تأثير قوى الجاذبية أحيانًا مكونة نجومًا نيوترونية ، وهي نجوم كثيفة بصورة غير معقولة أنهارت فيها كل الذرات نتيجة لاتحاد الإلكترونات والبروتونات مكونة نيوترونات فقط . وفي هذه الحالة يقل نصف القطر النهائي للنجم إلى حوالي 10^{-5} فقط من نصف القطر الأصلي للنجم . إذا اعتبرنا أن شمسنا تدور حول محورها مرة كل 25 يومًا تقريبًا ، (أ) ما هو الزمن اللازم لدورانها مرة واحدة حول محورها إذا حدث لها مثل هذا الانهيار ؟ (ب) أوجد نسبة طاقة الحركة الدورانية النهائية للنجم إلى طاقة حركته الأصلية .



شكل م12–8

■■ 60 ـ القالب المبين في الشكل م12–8 ، كتلته 25 g يدور في مسار دائري على منضدة لا احتكاكية وهو مربوط في أحد طرفي خيط يمر طرفه الآخر في ثقب يقع في مركز الدائرة تمامًا . وعندما كان نصف قطر الدائرة $r = 72$ cm كانت السرعة الزاوية للقالب 30 rev/min . (أ) ما مقدار القوة **F** ؟ (ب) إذا سحب الخيط إلى أسفل مسافة قدرها 12 cm ، فما مقدار السرعة الزاوية الجديدة للقالب ؟ (جـ) ما مقدار الشغل اللازم بذله بواسطة القوة **F** لتقصير نصف قطر الدائرة إلى 60 cm ؟ افترض أن القالب صغير جدًا بالنسبة إلى نصف قطر الدائرة وأن بالإمكان اعتباره نقطة مادية .

■■ 61 ـ ونش أسطواني كتلته M ونصف قطره R يلف في دوران مغزلي بسرعة زاوية مقدارها ω_0 بينما يلف حول حافته خيطًا مرتخيًا مربوط في طرفه الآخر جسم كتلته m موضوع على الأرضية تحت الونش . وبعد فترة معينة انتهى الجزء المرتخي من الخيط وبدأت الكتلة m في الارتفاع فجأة عن الأرضية . أثبت أن النسبة المفقودة من طاقة الحركة الكلية في عملية تسارع الكتلة إلى سرعتها النهائية تساوي $M/(M + 2m)$. إهمل التغيرات في طاقة الجهد التثاقلي .

■■ 62 ـ أسطوانة مصمتة منتظمة ذات شريط عريض ملفوف حول محيطها ، بحيث كان أحد طرفي الشريط مثبتًا في السقف (شكل م13–8) . حررت الأسطوانة من السكون ، فكان الشريط ينفك أثناء سقوطها بدون انزلاق . فإذا علمت أن كتلة

الأسطوانة 0.6 kg ونصف قطرها 20 cm ، أوجد (أ) العجلة الزاوية للأسطوانة ، (ب) الشد في الشريط ، (جـ) السرعة الزاوية لحظة سقوط الأسطوانة مسافة قدرها 2.5 m من موضعها الابتدائي .

63 ـ استخدم طرق الطاقة لتعيين مقدار سرعة مركز كتلة الأسطوانة المذكورة في المسألة 62 بعد أن تكون الأسطوانة قد سقطت مسافة قدرها 2.5 m . أثبت أن هذه النتيجة متفقة مع إجابة الجزء (جـ) .

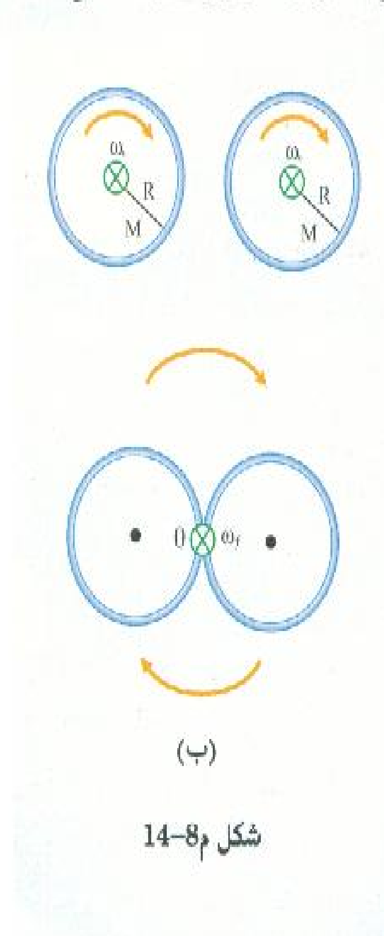


شكل م8-13

64 ـ قرصان متماثلان كتلة كل منهما M ونصف قطره R يدوران دورانًا مغزليًا على منضدة لا احتكاكية حول محور الكتلة بسرعة زاوية قدرها ω_0 (شكل م8-14أ) . تحرك القرصان تدريجيًا تجاه أحدهما الآخر ، وعند تلامسهما التصق القرصان معًا عند نقطة التلامس C . ونتيجة لذلك بدأ القرصان في الدوران حول النقطة C بسرعة زاوية قدرها ω_f (شكل م8-14ب) . عين ω_f بدلالة ω_0 .

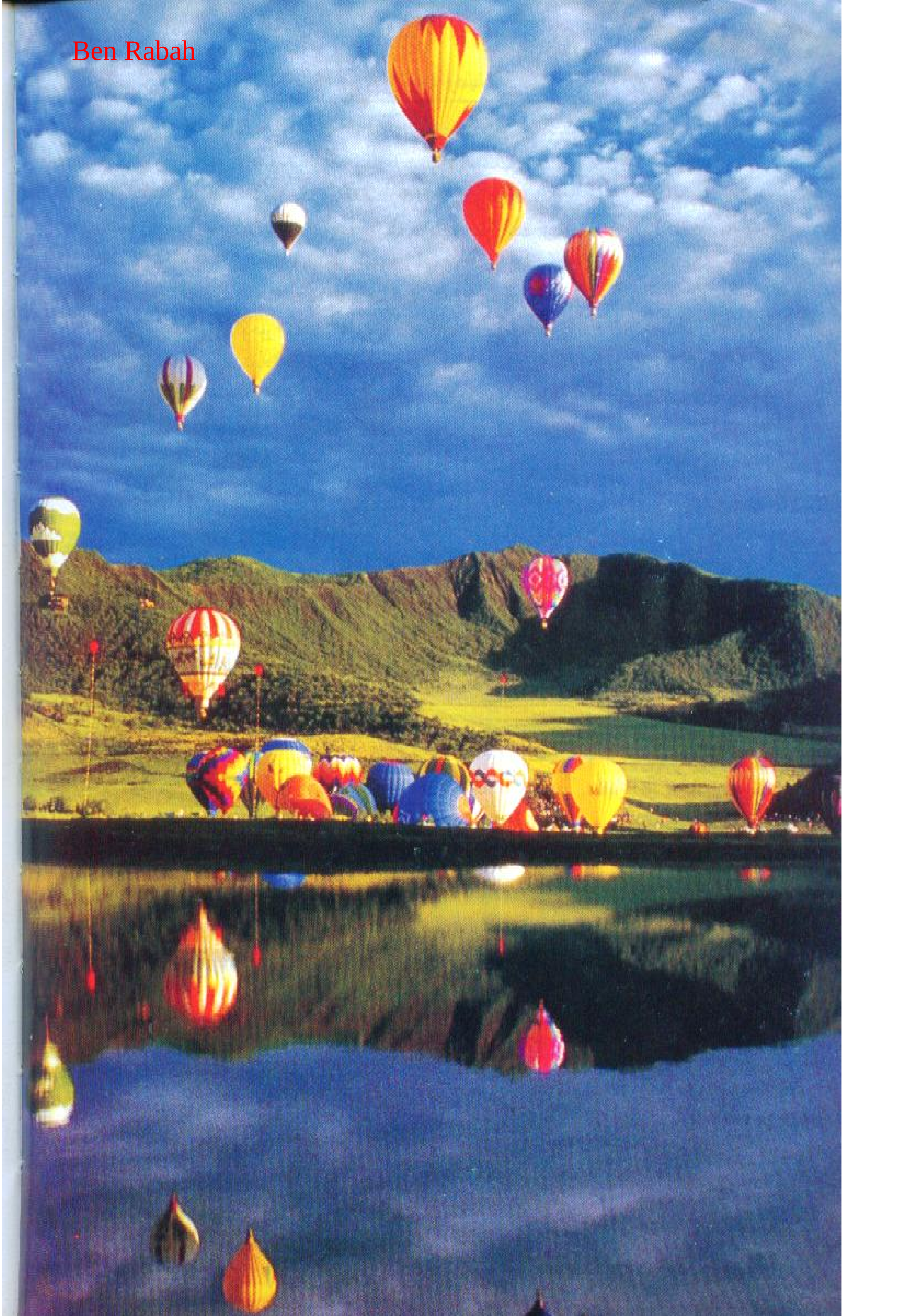
65 ـ أسطوانتان إحداهما مصمتة والأخرى على هيئة قشرة رقيقة كتلة كل منهما 1 kg ونصف قطرها 10 cm . بدأت الأسطوانتان في نفس اللحظة في التدحرج بدون انزلاق من السكون إلى أسفل من فوق مستوى مائل يصنع زاوية قدرها 30° مع الأفقي ارتفاعه (عن الأرض) 3 m . ما المسافة التي تكون الأسطوانة الأولى (المصمتة) قد قطعتها على المستوى المائل لحظة وصول الأخرى إلى القاع ؟

66 ـ تظل كمية التحرك الزاوي للأرض ثابتة أثناء دورانها في مدار إهليجي (ناقصي) حول الشمس . استخدم هذه المعلومة لإثبات أن مقدار السرعة الزاوية للأرض تصل إلى قيمتها العظمى عندما تكون الأرض أقرب ما يكون من الشمس .



(ب)

شكل م8-14



الجزء الثانى

الخواص الميكانيكية والحرارية للمادة : الذبذبات والموجات

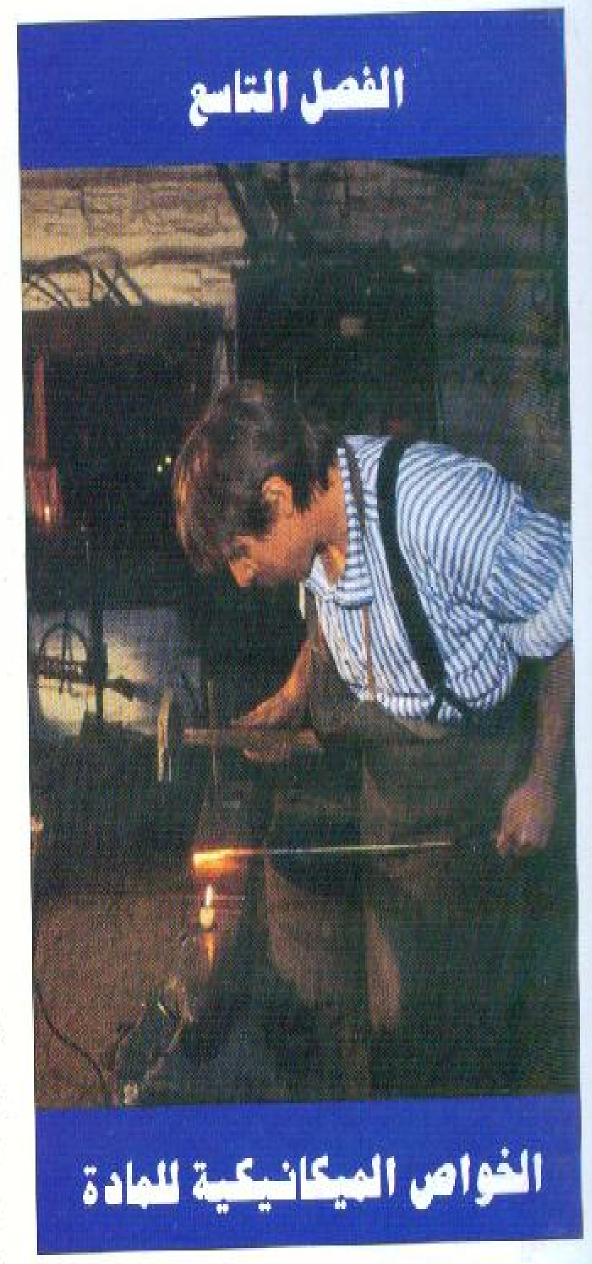
لكى ترى الحرارة تنتقل من جسم بارد الى اخر ساخن ليس من الضرورى أن تكون لديك الرؤية الحادة أو ذكاء وبراعة شيطان ماكسويل . يكفيك أن تتحلى ببعض الصبر.

هنرى بوانكير

بعد أن طورنا مفهومى الكتلة والقوة وتعلمنا بعض المبادئ اللازمة لوصف حركة المادة يمكننا أن نوجه اهتمامنا الآن إلى البحث فى الخواص الداخلية للمادة . وقبل أن يعرف أى شىء عن الذرات والجزيئات قام العديد من الفيزيائيين بدراسة الخواص الكلية ، أو الماكروسكوبية ، للمادة . ففى القرن الثالث قبل الميلاد تمكن المهندس الإغريقى أرشميدس من تفسير قوة الدفع التى يؤثر بها سائل على جسم مغمور فيه . وفى القرنين السابع عشر والثامن عشر نجح الباحثون فى وضع القوانين التى تصف تأثير الضغط ودرجة الحرارة على الغازات المختلفة . وفى نفس هذه الفترة تمت أيضًا دراسة الحالات الفيزيائية المختلفة للمادة (الصلبة والسائلة والغازية) وكذلك درجة استطالة وانضغاط المادة عند تعرضها لتأثير القوى الخارجية . ومن بين الظواهر الأخرى المترتبة على الخواص الماكروسكوبية يمكن ذكر الطريقة التى تنساب بها الموائع والعلاقة بين الحرارة المضافة إلى مادة والتغير الناتج فى درجة الحرارة أو التغير فى الحالة .

ظلت دراسة الحرارة والخواص الحرارية للمادة تسير فى طريق منفصل عن دراسة الميكانيكا حتى منتصف القرن التاسع عشر . ويعتبر التوصل إلى فهم الحرارة باعتبارها نوعًا من الطاقة وأن وحدات قياس كميات الحرارة لها ما يكافؤها من وحدات الطاقة الميكانيكية واحدًا من أهم الإنجازات التى تحققت فى هذا القرن ، وهذا ما سنتعرض لوصفه فى مقالات « الخلافات العظيمة » فى الفصل الحادى عشر . كذلك فإن قوانين الديناميكا الحرارية ، التى تصف إمكانية تحويل الحرارة إلى شغل والشغل إلى حرارة ، هى المبادئ الأساسية لعمل الآلات الحرارية والمبردات .

كذلك هناك مجموعة كبيرة من الظواهر المترتبة على الذبذبات ، أو الاهتزازات ، وهى الحركة التى تتكرر على فترات منتظمة (أو فى دورات منتظمة) . ومثل هذه الحركة ، كالبندول مثلا ، تمدنا بطريقة سهلة مناسبة لقياس الوقت . علاوة على ذلك فإن الخواص الحجمية للمادة هى التى تتعين بها كيفية انتقال الاهتزازات فى مختلف المواد على صورة موجات ، والتى تعتبر أساس فهمنا للصوت ومبادئ عمل الآلات الموسيقية .



الفصل التاسع

الخواص الميكانيكية للمادة

تتكون كل المواد من ذرات . والقوى بين ذرات المادة ذات طبيعة كهربائية أساسًا وذلك لأن الذرات نفسها مكونة من جسيمات مشحونة (إلكترونات وبروتونات) . والواقع أن الطريقة التى ترتب بها الذرات نفسها فى المادة وتتكون بها مجموعات الذرات هى التى تحدد السلوك الحجمى للمادة . هذه الخواص الحجمية للمادة ، وهى ما يعرف عادة بالخواص **الميكانيكية** ، هى التى تمثل غالبًا القدر الأكبر من الأهمية لمعظم الأغراض العملية ، بدلاً من الوصف الذرى التفصيلى للمادة . وسوف نتناول بالدراسة فى هذا الفصل بعض الخواص الميكانيكية كالكثافة والمرونة وضغط وانسياب الموائع .

9-1 حالات المادة

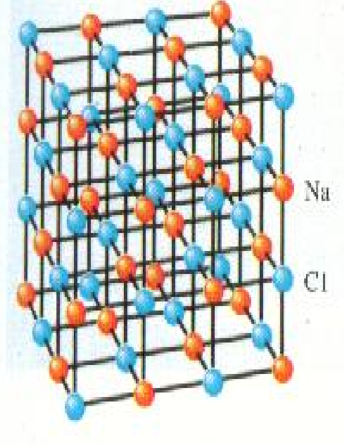
يتكون العالم من حولنا من ثلاثة أنواع متميزة من المواد : الجوامد والسوائل والغازات ، وسوف نسمى هذه الأنواع بحالات المادة الثلاث . ويكمن الفرق الأساسى بين هذه الحالات فى طريقة تأثير القوى بين الذرات أو الجزيئات المكونة للمادة . ففى الغازات تكون القوى بين الذرية غير موجودة عمليًا . وهذا ما يسمح لذرات (أو جزيئات) الغاز المنفردة بأن تتحرك مستقلة عن بعضها البعض ، إلا أثناء التصادمات التى تحدث بين جزيئات الغاز . هذه الحرية فى الحركة تسمح أيضًا

للغاز بأن يملأ أى حجم متاح له . أما فى السوائل والجوامد فإن هـذه القـوى تكـون كبيرة جـدًا لدرجة أن القوى الخارجية لا يمكنها أن تغير الحجم الـذى تشغله عينة من المادة الصلبة (الجامد) أو السائل تغييرًا محسوسًا ، ولــهذا يقـال أن الجوامـد والسوائل **غير قابلة للانضغاط** . وفى الجوامد ترتب القوى بين الذريـة ذرات المـادة فى نظام جاسئ ثلاثى الأبعاد ، أو بنية شبيكية . ولـهذا السبب لا تكـون الجوامـد غير قابلة للانضغاط فقط ، بل أنها تكون **جاسئة** أيضًا بحيث تقاوم محاولات تغيير شكلـها . ونظرًا لأن هذه البنية الثلاثية الأبعاد غير موجودة فى السوائل فإن **قابلية التشوه** السوائل كبيرة بحيث تأخـذ شكل الإناء الـذى تشغله ويمكنها الانسياب تحت تأثير القوى عليها .

صلب — +حرارة → سائل — +حرارة → غاز

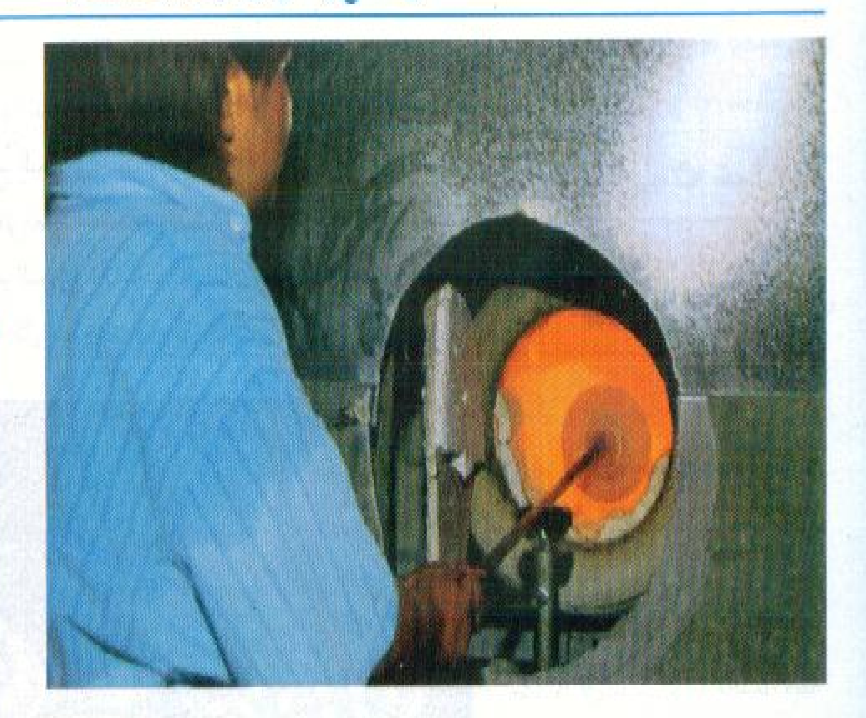
شكل 1–9 :
يمكن أن يتواجد الماء فى ثلاث حالات .

تتوقف الحالة التى توجد فيها مادة معينة على درجة حرارة المادة والضغط الخارجى المحيط بها . فالماء مثال مألوف لنا جميعًا إذ تتغير حالته من الحالـة الصلبـة إلى السائلة إلى الغازية (البخارية) عند امتصاصه للحرارة (شكل 1–9) .



شكل 2–9 :
جزء صغير مـــن بلـورة ملـح الطعـام (NaCl) .

وبالرغم من أن هذا التقسيم يبدو بسيطًا فإن هناك حالات كثيرة يصعب فيها التمييـز بين حالات المادة . فمثلاً ؛ معظم الجوامد لــها بنيـة شبيكيـة مرتبـة ثلاثيـة الأبعـاد ، وهذه تعرف باسم **الجوامد البلورية** ؛ ويمثل الشكل 2–9 التماثل المكعبى لأحد الجوامد البلورية وهو ملح الطعام . وهناك أيضًا نوع آخر من الجوامد تكون ذراتــه مرتبـة بطريقـة عشوائية لا تتميز بهذا الترتيب المنتظم بعيـد المـدى . هـذه الجوامـد تسمى بـالجوامد **الأمورفية أو غير البلورية** ، وهى غالبًا تنساب ببطئ شديد جدًا جـدًا ويتغيـر شكلـها بمرور السنين . والزجاج وكثير من اللدائن من أشهر أمثلة هذا النوع من الجوامد . وبعكس الجوامد البلورية فإن الجوامد الأمورفية ليس لـها نقطـة انصـهار حـادة محـددة ؛ فعنـد تسخين مثل هذه المواد سـوف نجد أن تزداد تشابها مع السوائل بشكـل تدريجـى وليس فجائيًا وتزداد مع هذا قابليتها للانسياب ويشاهد مثل هـذا الغمـوض فـى الانتقـال بـين حالات المادة أيضًا عند الضغوط العالية ، حيـث يكـون التحـول بـين الحـالتين الغازيـة والسائلة غير واضح فى كثير من المواد .



ينساب الزجاج كسائل لزج عند درجات الحرارة العالية جدًا .

جدول 1–9 الكثافات

المادة	الكثافة (kg/m^3)
الغازات (عند 1 atm و 0°C، ما لم ينص على غير ذلك)	
هواء	1.29
هواء (20°C)	1.20
هيليوم	0.179
ثاني أكسيد الكربون	1.98
السوائل (عند 20°C ما لم ينص على غير ذلك)	
ماء (4°C)	1.00×10^3
ماء	0.998×10^3
ماء البحر	1.025×10^3
كحول إيثيلي	0.79×10^3
زئبق (0°C)	13.6×10^3
بنزين السيارات	0.860×10^3
الجوامد (عند 20°C)	
ألومنيوم	2.70×10^3
عظم (تقريبًا)	1.8×10^3
نحاس أصفر	8.7×10^3
نحاس	8.89×10^3
زجاج (تقريبًا)	2.6×10^3
ذهب	19.3×10^3
جرانيت	2.7×10^3
ثلج (0°C)	0.92×10^3
حديد	7.86×10^3
رصاص	11.3×10^3
أوزميوم	22×10^3

جدول 2–9 كثافة الماء

درجة الحرارة (0°C)	الحالة	الكثافة (g/cm^3)
0	صلب	0.917
0	سائل	0.9998
3.98	سائل	1.000
10	سائل	0.9997
25	سائل	0.9971
100	سائل	0.9584

9-2 الكثافة والوزن النوعي

كثيرًا ما نستخدم خاصية للمادة تسمى **الكثافة** ، وهي تعرف كالتالي :

$$\text{الكثافة} = \frac{\text{كتلة المادة}}{\text{حجم المادة}}$$

وتمثل الكثافة بالحرف اليوناني ρ (رو) . وهكذا ، إذا كان حجم جسم ما V وكتلته m فإن كثافته تكون :

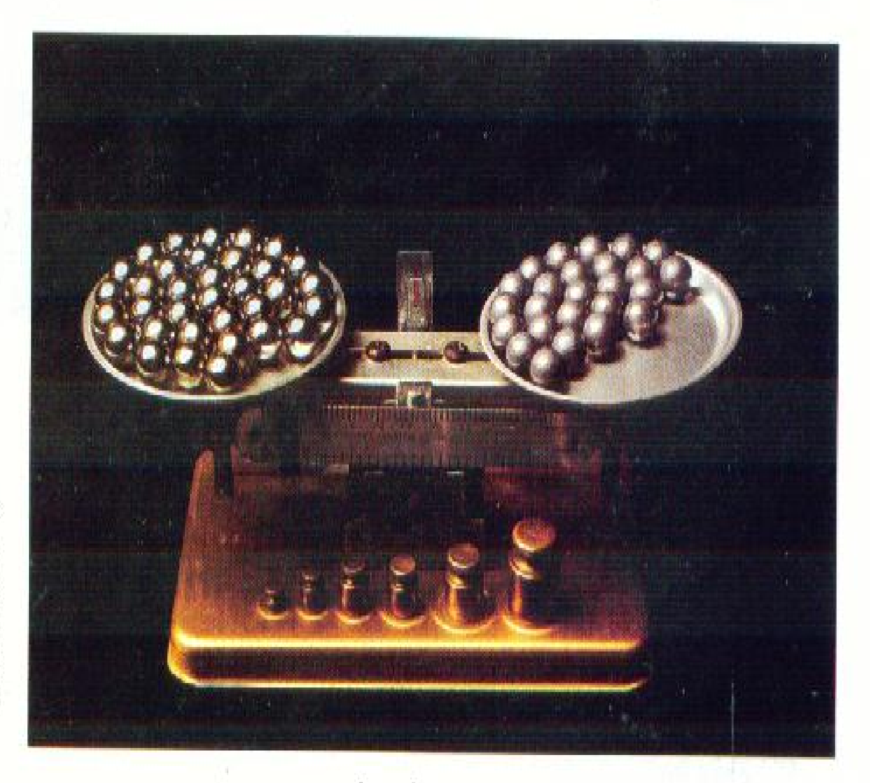
$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (9\text{-}1)$$

الوحدة SI للكثافة هي الكيلو جرامات لكل متر مكعب ، ولكن تعطى الكثافة أحيانًا بالجرامات لكل سنتيمتر مكعب ، ويمثل الجدول 1–9 القيم النمطية لكثافة بعض المواد .

ونظرًا لأن معظم المواد تتمدد بزيادة درجة حرارتها فإن الكثافات تقل عادة بتسخين هذه المواد . الاستثناء المشهور من هذه « القاعدة » هو الماء بين درجتي 0°C و 4°C . ففي حالة الثلج تكون جزيئات H_2O مرتبة في شبيكية تكون فيها ذرات الأكسجين مجسمات رباعية السطوح . هذا الترتيب في ثلاثة أبعاد يؤدي إلى تكوين قرص نحل من الفراغات السداسية الخالية بين المجسمات رباعية السطوح ، ولهذا تكون كثافة الثلج صغيرة نسبيًا . وعند انصهار الثلج تظل بعض المجسمات رباعية السطوح موجودة عند 0°C ، ولكنها تستطيع الحركة بالنسبة إلى جيرانها لتملأ بعض الفراغات السداسية الخالية ، وهذا يؤدي إلى زيادة قدرها 10 في المائة تقريبًا في الكثافة عند الانصهار . وإذا ما ارتفعت درجة الحرارة عن 4°C سوف تتسبب الطاقة الحرارية العالية للجزيئات في زيادة متوسط المسافة بين الجزيئات كما في حالة المواد الأخرى . هذا ويلخص الجدول

9-2 السلوك الغريب لكثافة الماء حول نقطة التجمد .

هذه الخاصية من خواص الماء لها نتائجها الهامة في العالم من حولنا ، فهي تعني أن الثلج يتكون في الشتاء على سطح البحيرات والأنهار وليس في قاعها ، وهذا بدوره يسمح للثلج بالانصهار في الربيع عند تعرضه للشمس والرياح الدافئة . ويحدث في عملية التجمد أن يهبط الماء البارد من سطح البحيرة ليسمح بذلك للماء الدافئ بالارتفاع إلى أعلى . هذا « التقليب » يقوم بأعباء أكسجة كل مستويات الماء في البحيرة مرتين في كل عام .

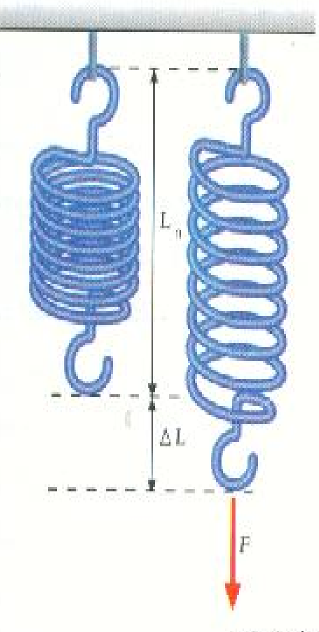


كريات الرصاص (على اليمين) وكريات الصلب (على الشمال) متساوية في الحجم . وحيث أن كثافة الرصاص أكبر من كثافة الصلب فإن عددًا أقل من كريات الرصاص يتساوى في الوزن مع عدد أكبر من كريات الصلب .

الوزن النوعي (SG) خاصية مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالكثافة ، وتعرف بالنسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء عند 4°C :

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \qquad (9\text{-}2)$$

لاحظ أن الوزن النوعي **عدد لا بعدي** ، فمثلاً ، الوزن النوعي للرصاص والألومنيوم ، طبقًا للجدول 1-9 ، يساوي 11.3 و 2.70 على الترتيب .



شكل 3-9 :
يتناسب التشوه ΔL تناسبًا طرديًا مع F في حالة هذا الزنبرك الذي يتبع قانون هوك .

مثال توضيحي 1-9

مكعب من اليورانيوم ($\rho = 18,680\ kg/m^3$) طول كل من أضلاعه 2.00 cm (أ) أوجد كتلته ، (ب) ما طول ضلع مكعب من الثلج ($\rho_i = 920\ kg/m^3$) له نفس الكتلة ؟

استدلال منطقي : (أ) من تعريف الكثافة ، $\rho = m/V$ ، نجد أن :

$$m_u = \rho_u V_u = (18.680\ \ kg/m^3)(8.00 \times 10^{-6}\ m^3 = 0.149\ kg$$

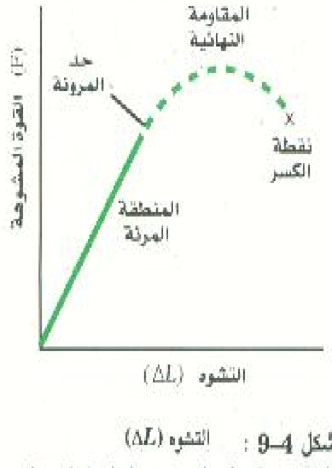
(ب) مرة أخرى ، من تعريف الكثافة :

$$V_i = \frac{m_i}{\rho_i} = \frac{0.149\ \text{kg}}{920\ \text{kg/m}^3} = 162 \times 10^{-6}\ \text{m}^3$$

وبأخذ الجذر التكعيبى لهذا العدد نجد أن طول ضلع المكعب 5.45 m . ■

9-3 قانون هوك ، معاملات المرونة

يتميز كثير من الأجسام ، كالسلك الزنبركى أو القضيب المعدنى ، بخاصية تسمى **المرونة** ، فعندما يستطيل الجسم أو ينضغط تحت تأثير قوة مسلطة فإنه يميل إلى العودة إلى طوله الأصلى عند إزالة القوة . لنفرض مثلاً أن الزنبرك المبين بالشكل 3-9 طوله الأصلى L_0 وأنه قد استطال بمقدار ΔL تحت تأثير القوة المسلطة **F** . بدراسة هذا السلوك وجد روبرت هوك (1635 ـ 1703) أن الاستطالة تتضاعف مرتين إذا تضاعفت القوة المسلطة مرتين ، بشرط ألا تكون الاستطالة كبيرة جدًا ؛ أى أن $F \propto \Delta L$ عمومًا . وقد وضع هوك اكتشافاته هذه فى صورة قاعدة تعرف الآن **بقانون هوك** :

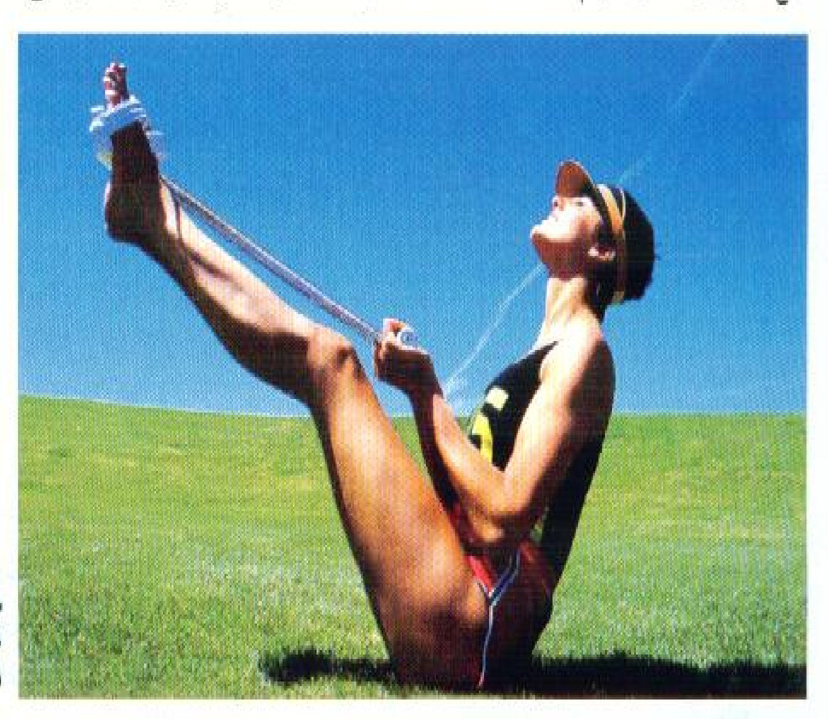


شكل 4-9 : التشوه (ΔL)
المنحنى النمطى للإجهاد مقابل الانفعال . ينطبق قانون هوك فى المنطقة المرنة فقط . تعرف أكبر قوة يمكن أن يتحملها الجسم المشوه بالمقاومة النهائية . عادة تخضع (تلين) المادة المرنة قبل الكسر بقليل .

عندما يمتد جسم مرن أو يتشوه بأى صورة أخرى فإن مقدار التشوه يتناسب خطيًا مع القوة المشوهة .

ولكن عند امتداد (استطالة) الزنبرك بمقدار كبير بحيث يتعدى ما يعرف بحد المرونة فإنه ينحرف عن هذا التناسب الطردى بين ΔL و F . وعلاوة على ذلك سنلاحظ أن الزنبرك لن يعود إلى طوله الأصلى عند إزالة القوة المسلطة .

وعند استبدال الزنبرك المبين بالشكل 3-9 بقضيب مصمت سنجد أيضًا أن القضيب يتبع قانون هوك . وبالرغم من أن الاستطالة النسبية للقضيب أصغر كثيرًا من قيمتها فى

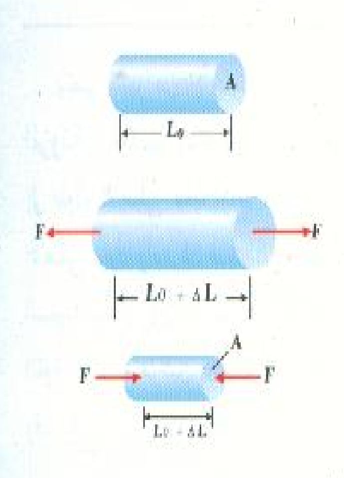


سلوك الزنبركات طبقًا لقانون هوك يجعلها أجهزة ممتازة للتمارين الرياضية . كلما زادت الاستطالة تزيد قوة شدك للزنبرك .

حالة الزنبرك فإن القضيب يستطيل بانتظام بما يتفق مع قانون هوك ؛ ولكن قيم الاستطالة تكون أصغر مما في حالة الزنبرك ؛ ويوضح الشكل 4–9 السلوك المشاهد عمليًا في تجربة نموذجية من هذا النوع . لاحظ أن قانون هوك ينطبق في المنطقة المرنة فقط ، وسوف يفترض في المناقشة الآتية أن القوة والاستطالة صغيران بحيث لا يتعدى تشوه المادة حد مرونتها .

لاستخدام قانون هوك في وصف الخواص المرنة للجوامد سوف نستخدم مصطلحين هامين هما **الإجهاد والانفعال** ، وسنقوم بتعريف هاتين الكميتين بمساعدة تجربة الاستطالة (**أو الشد**) المبينة بالشكل 5–9 . في هذه التجربة تؤثر القوة الشادة (المطيلة) **F** عموديًا على المساحة الطرفية A لقضيب طوله الأصلي L_0 فيستطيل القضيب نتيجة لذلك بمقدار ΔL . يعرف الإجهاد الناتج عن **F** كالتالي :

$$\text{الإجهاد} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}} = \frac{F}{A} \qquad (9\text{–}3)$$



شكل 5–9 :
إجهاد الشد وإجهاد الضغط في حالة قضيب منتظم الإجهاد هو F/A والانفعال هو $\Delta L / L_0$

وحدات الإجهاد في النظام SI هي النيوترون لكل متر مربع (N/m^2) .

ويعرف انفعال القضيب في الشكل 5–9 كما يلي :

$$\text{الانفعال} = \frac{\text{الاستطالة}}{\text{الطول الأصلي}} = \frac{\Delta L}{L_0} = \text{التغير النسبي في الطول} \qquad (9\text{–}4)$$

وقد عرف الانفعال بالنسبة $\Delta L / L_0$ ، بدلاً من ΔL ، لأن أي جسم مرن يستطيل بمقدار يتناسب طرديًا مع طوله الأصلي . وبقسمة ΔL على L_0 نكون قد تخلصنا من تأثير طول الجسم على الاستطالة ، وهو تأثير لا يمثل أي أهمية فيما يتعلق بخواص مادة القضيب ذاتها .

ونظرًا لأن الانفعال نسبة بين طولين فإنه كمية ليست لها وحدات . وسنرى مؤخرًا في هذا القسم أن هناك أنواعًا أخرى من الانفعال ، وهذا يتوقف على الناحية الهندسية للموقف . أما في هذه الحالة الحالية فإننا نتحدث عن انفعال شد . ولكن إذا ضغط القضيب في اتجاه مواز لطوله فإن الانفعال ، طبقًا للتعريف ، سيكون أيضًا هو النسبة بين التغير في الطول والطول الأصلي .

الآن يمكننا إعادة صياغة قانون هوك . ذلك أن الإجهاد مقياس للقوة المشوهة والانفعال مقياس للتشوه . وعليه يمكن كتابة قانون هوك على الصورة :

$$\text{الإجهاد} = (\text{ثابت})\,(\text{الانفعال}) \qquad (9\text{–}5)$$

وبهذه الصورة يمكن تطبيق قانون هوك على مواقف كثيرة تختلف عن استطالة القضيب ، وقد أثبتت تجارب هوك أن هذا القانون صالح للتطبيق في حالات استطالة وانحناء وفي العديد من الزنبركات والأجسام الأخرى . وكما أوضحنا سابقًا فإن قانون هوك ينطبق طبعًا في المنطقة المرنة من التشوهات فقط .

يعتمد ثابت التناسب في المعادلة (5–9) على طبيعة المادة ونوع التشوه الذي تعانيه ،

وهو يعرف **بمعامل مرونة** المادة . إذن ، طبقًا للتعريف :

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}} \tag{9-6}$$

وحيث أن الانفعال كمية ليس لها وحدات ، فإن وحدات معامل المرونة هى نفس وحدات الإجهاد . لاحظ أن معامل المرونة يكون كبيرًا عندما يسبب الإجهاد الكبير انفعالاً صغيرًا فقط . **وعليه فإن معامل المرونة مقياس لجسوءة المادة** . وهناك ، فى الواقع ، عدة أنواع من معاملات المرونة ، وهذا يتوقف على تفاصيل الطريقة التى تستطيل بها المادة أو تنحنى أو تتشوه بأى طريقة أخرى من الطرق . لنناقش الآن أشهر هذه العاملات وأكثرها استعمالاً .

معامل يونج

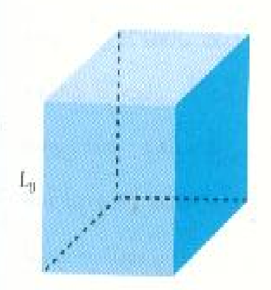
يعرف الإجهاد المؤثر عموديًا على مساحة معينة وفى بعد واحد ، كما بالشكل 5-9 ، **بالإجهاد الطولى** . وهذا النوع يمكن أن يكون إجهاد شد (يسبب استطالة الجسم) أو إجهاد تضاغط (يسبب تقصير الجسم) فى بعد واحد . ويسمى معامل المرونة الذى يصف التغير النسبى فى الطول فى هذين الموقفين **بمعامل يونج** ، Y :

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \tag{9-7}$$

جدول 3-9 : الخواص المرنة التقريبية .

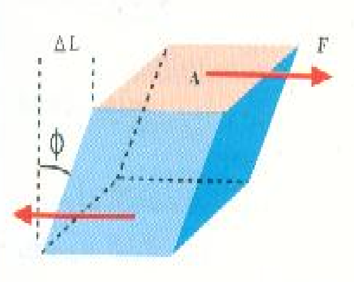
المادة	معامل يونج $(10^9\ N/m^2)$	معامل القص $(10^9\ N/m^2)$	معامل المرونة الحجمية $(10^9\ N/m^2)$	حد المرونة $(10^9\ N/m^2)$	مقاومة الشد $(10^9\ N/m^2)$
ألمنيوم	70	23	70	0.13	0.14
نحاس أصفر	90	36	60	0.35	0.45
نحاس	110	42	140	0.16	
زجاج	55	23	37		
حديد (مليف)	90	70	100	0.17	0.32
رصاص (مدلفن)	16	6	8		0.02
بولى ستيرين	1.4	0.5	5		0.05
مطاط	0.004	0.001	3		0.03
صلب	200	80	160	0.24	0.48
تنجستن	350	120	20		0.41
بنزين (عطرى)			1.0		
زئبق			28		
ماء			2.2		
هواء			1×10^{-4}		

ويمثل الجدول 3-9 القيم النمطية للمعامل Y لبعض المواد ، لاحظ أيضا أن الجدول يحتوى على قيم حد المرونة ومقاومة الشد . وإذا زاد الإجهاد المسلط على المادة عن حد المرونة فإن المادة لن تعود إلى طولها الأصلي ، بل إنها سوف تحتفظ باستطالة دائمة إذا ما أزيل الإجهاد المؤثر عليها . كذلك فإن مقاومة الشد تعرف بأنها إجهاد الشد الذى يسبب كسر المادة .



معامل القص (المرونة القصية)

لنفرض أننا حاولنا تشويه مكعب من المادة بالطريقة الموضحة بالشكل 6-9 . فى هذه الحالة تسلط القوة فى اتجاه موازٍ للوجه العلوى للمكعب ، ومساحته A . نتيجة لتأثير هذه القوة يتحرك الوجهان العلوى والسفلى للمكعب فى اتجاهين متضادين متوازيين أحدهما مع الآخر ، وهذا ما يسمى **بالقص** . ويعرف **الإجهاد القصي** فى هذه الحالة بأنه F/A ، كما يعرف **الانفعال القصي** بالنسبة $\Delta L/L_0$ ، ولكن من الضرورة بمكان مراعاة الانتباه الشديد لطريقة تعريف هذه الرموز فى الشكل . فالطول L_0 هو سمك المادة مقاسًا على استقامة خط رأسي في الشكل 6-9 ؛ وعند تسليط قوة القص سوف يتشوه هذا الخط الرأسي بزاوية مقدارها ϕ تسمى **زاوية القص** . أما ΔL فيمثل مقدار إزاحة إحدى نهايتي هذا الخط بالنسبة إلى موضعها الأصلي . وهكذا يمكننا أن نرى من الشكل 6-9 أن الانفعال القصي يصبح $\Delta L / L_0 = \tan\phi$. ومن التعريف العام لمعامل المرونة نجد أن **معامل المرونة القصية** ، S ، هو :



شكل 6-9 :
ΔL هنا مبالغ فى تكبيرها حتى يمكن رؤيتها ، يعطى معامل المرونة الحجمية بالعلاقة :
$(F/A)/(\Delta L/L_0) = (F/A)/\tan\phi \cong (F/A)\phi$

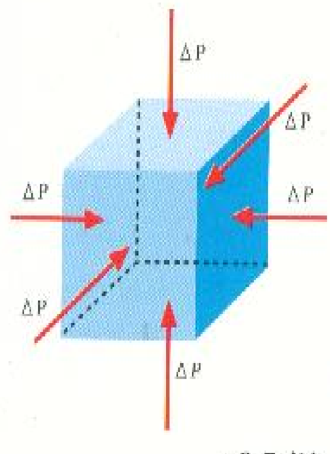
$$S = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \frac{F/A}{\tan\phi} \qquad (9\text{-}8)$$

وعندما تكون زاوية القص صغيرة (بضع درجات أو أقل) ، يمكن استخدام التقريب $\tan\phi = \phi$ ، وكتابة :

$$S = \frac{F/A}{\phi}$$

هذا ويتضمن الجدول 3-9 القيم النمطية للمعامل S لبعض المواد . ويلاحظ أن $S = 0$ للسوائل لأنها تنساب $(\Delta L/L_0)$ تحت تأثير القوى القاصة .

معامل الحجم (المرونة الحجمية)



شكل 7-9 :
مكعب حجمه الأصلي V_0 . تحت تأثير زيادة فى الضغط الخارجي قدرها ΔP سوف ينكمش المكعب بمقدار ΔV . تبين الأسهم اتجاه مركبات القوة المسببة لزيادة الضغط .

لنفرض أن قالبًا مكعبًا حجمه V_0 قد تعرض لزيادة فى الضغط على جميع أوجهه بمقدار ΔP (شكل 7-9) . عندئذ سيكون التغير فى حجم المكعب ΔV عددًا سالبًا لأن الحجم ينكمش . وفى هذه الحالة يعرف الانفعال بأنه $-\Delta V / V$ ، ويكون الإجهاد F/A هو الزيادة فى الضغط ΔP . وكما فى حالة الأنواع الأخرى من معاملات المرونة يعرف معامل **المرونة الحجمية** بأنه النسبة بين الإجهاد والانفعال* :

* أدخلت الإشارة السالبة لأن ΔV يكون سالبًا عندما يكون ΔP موجبًا .

$$\text{معامل المرونة الحجمية} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_0} \qquad (9-9)$$

الانضغاطية الحجمية

انضغاطية المادة k مقياس لقابلية المادة للانضغاط ، أى أن الانضغاطية هى مجرد مقلوب معامل المرونة الحجمية . وعادة تكتب معادلة تعريف الانضغاطية على الصورة :

$$-\frac{\Delta V}{V_0} = k\Delta P$$

يلاحظ أن وحدات الانضغاطية هى وحدات مقلوب الضغط . كذلك فإن انضغاطية السوائل عمومًا أكبر بكثير من انضغاطية الجوامد .

مثال 9-1 :

يتكون بندول معلق فى قاعة محاضرات كبيرة من كرة كتلتها 40 kg تتدلى من طرف سلك من الصلب طوله 15 m . (أ) ما هى مساحة مقطع السلك إذا كان الإجهاد المؤثر يساوى 10 فى المائة فقط من إجهاد الكسر ؟ (ب) ما مقدار الاستطالة التى تسببها الكرة فى السلك ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن معرفة إجهاد كسر الصلب ؟

الإجابة : إجهاد كسر المادة هو مقاومة شدها . بالرجوع إلى الجدول 3-9 نجد أن مقاومة شد الصلب هى : 0.48×10^9 N/m^2 .

سؤال : بماذا يتعين الإجهاد المؤثر على السلك ؟

الإجابة : كتلة الكرة 40 kg ، وعليه فإن وزنها يكون 390 N ، والإجهاد يساوى هذه القوة مقسومة على مساحة مقطع السلك .

سؤال : ما هى المعادلة اللازم استخدامها لتعيين مساحة مقطع السلك A ؟

الإجابة :
$$\frac{F}{A} = (0.10)(0.48 \times 10^9 \text{ N/m}^2)$$

حيث F = 390 N ، والعامل 0.10 يمثل النسبة 10 فى المائة المذكورة بالمسألة .

سؤال : ما علاقة استطالة السلك بهذا الإجهاد المؤثر ؟

الإجابة : الاستطالة النسبية تعتمد على الإجهاد طبقًا لتعريف معامل يونج ($Y = 200 \times 10^9$ N/m^2 للصلب) :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F/A}{Y}$$

الحل والمناقشة : (أ) مساحة المقطع هى :

$$A = \frac{390 \text{ N}}{0.48 \times 10^8 \text{ N/m}^2} = 8.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

وباستخدام العلاقة $A = \pi R^2$ نجد أن نصف قطر السلك $1.6\ nm$ تقريبًا .

(ب) التغير النسبى فى الطول هو :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0.48 \times 10^8\ \text{N/m}^2}{200 \times 10^9\ \text{N/m}^2}$$

$$= 2.4 \times 10^{-4}$$

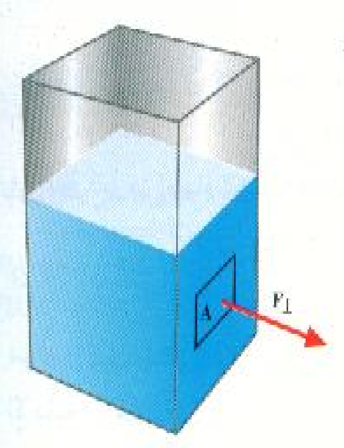
إذن :

$$\Delta L = (2.4 \times 10^{-4})(15\ \text{m}) = 3.6\ \text{mm}$$

تمرين : ما مقدار الإجهاد اللازم لكى يستطيل سلك من الألمنيوم بمقدار 0.020 فى المائة ؟

الإجابة : $1.4 \times 10^7\ \text{N/m}^2$

9-4 الضغط فى الموائع



شكل 8-9 :
متوسط الضغط على المساحة A يساوى $F_\perp / A$.

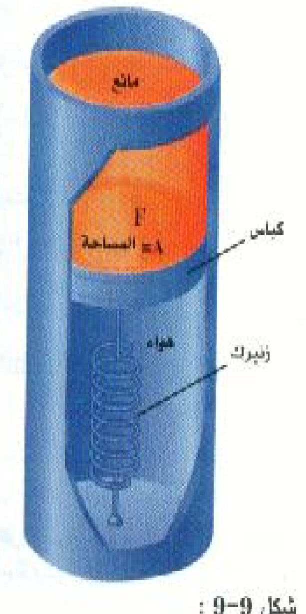
يمثل الشكل 8-9 سائلاً فى وعاء ؛ هذا المائع ساكن ، ويؤثر على جدران الوعاء بقوة معينة إلى الخارج . سنفترض أن القوة المؤثرة على المساحة A إلى الخارج هو $\mathbf{F}_\perp$ ، حيث ينبهنا الدليل السفلى أن القوة عمودية على جدار الوعاء . يعرف متوسط الضغط على المساحة A بالعلاقة :

$$\text{متوسط الضغط} = \overline{P} = \frac{F_\perp}{A} \qquad (9\text{-}10)$$

ومع أن الضغط كمية غير متجهة ، يجب أن نتذكر أن القوة المسببة للضغط نفسها لها اتجاه بالرغم من أننا نحذف الدليل السفلى عادة من القوة $\mathbf{F}_\perp$. ومن تعريف الضغط يمكننا أن نرى أن الوحدات SI للضغط هى نفس وحدات الإجهاد ؛ أى N/m^2 . وفى الحقيقة يعتبر الضغط مثالاً من أمثلة إجهاد التضاغط كما رأينا فى القسم السابق . ومع ذلك فإن الوحدة N/m^2 كوحدة ضغط تسمى عادة باسكال (Pa) . أى أن :

$$1\ \text{N/m}^2 = 1\ \text{Pa}$$

هذا وسوف نقابل وحدات كثيرة أخرى للضغط ، ربما أكثر من أى كمية فيزيائية أخرى . ولتلافى اللبس والخلط بين هذه الوحدات رأينا تلخيص الوحدات المستخدمة لقياس الضغط داخل غلاف هذا الكتاب .



شكل 9-9 :
جهاز بسيط لقياس الضغط .

يمكن استخدام الجهاز الموضح بالشكل 9-9 لقياس الضغط داخل أى مائع . وإذا كانت $\mathbf{F}$ هى القوة التى يؤثر بها المائع على الكباس فإن الكباس سوف يتحرك حتى تتعادل القوة المؤثرة بواسطة الزنبرك مع القوة الناتجة عن المائع ، وعند معايرة الجهاز بطريقة مناسبة يمكن استخدام إزاحة الكباس لقياس F . وإذا كانت A مساحة الكباس فإن الضغط سيكون ببساطة F/A . وبجعل مساحة الكباس صغيرة جدًا يمكننا الحصول

على قيمة الضغط على بعد صغير جدًا من أى نقطة داخل المائع ؛ هــذه الكميــة هــى مـا نقصده عند الحديث عن الضغط عند نقطة معينة ما داخل المائع .

لنناقش الآن عددًا من الحقائق الــهامة عن الضغط والقوى داخـل الموائـع ، وهــذه الحقائق تنطبق بــالتحديد علــى الموائع **غير القابلــة للانضغــاط**. هـذا يعنــى عمليًا أن الانضغاطية الحجمية لمثل هذه الموائع من الصغـر بحيث لا يسبب الضغـط أى تغيرات محسوبة فى الحجم . وعمليًا تعتبر السوائل موائع غير قابلة للانضغاط ، ولكن هذا غــير صحيح فى حالة الغازات .

1 ـ فــى مائـع ساكن ، تكون القوى المؤثرة بواسطة المائع عمودية دائمًا على الأسطح اللامسة للمائع بصرف النظر عن « اتجاه » هذه الأسطح .

طبقًا لقانون نيوتن الثالث يجب أن تكون القوى المؤثرة بواسـطة السـطح علـى المـائع مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه لتلك القوى المؤثرة بواسطة المائع على السطح . هذا يعنى عدم وجود أى مركبة للقوة فى الاتجاه الموازى للسطح لأن المائع لا يمكـن أن يظـل ساكنًا إذا وقع تحت تأثير القوى القاصة .

2 ـ فى المائل الساكن ، يجب أن يكون صافى القوى المؤثرة على أى عنصر حجمى صفرًا .

هذا ينتج مباشرة من قانون نيوتن الثانى . فإذا كان صافى القوى المؤثر على أى جزء من المائع لا يساوى صفرًا فإن المائع يجب ان ينساب تحت تأثير هـذه القـوة ؛ وهـذا يتعارض مع الفرض بأن المائع ساكن .

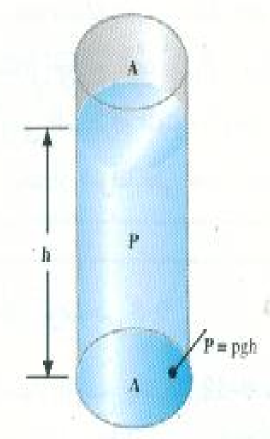
3 ـ الضغط الناتج عن وزن المائع عند أى نقطة تقع على عمق قدره h تحت سـطح مـائع كثافته ρ يساوى ρgh .

لإثبات أن $P=\rho gh$ يمكننا الاستعانة بالشكل 10-9 الذى يمثل مائعًا كثافته ρ فى وعاء أسطوانى الشكل . وزن المائع عند القاع ، أى على عمق قدره h تحت السطح هو :

$$\text{الوزن} = Mg = \rho Vg$$

حيث $M=\rho V$ عبارة عن كتلة عمود المائع . هذا الوزن موزع بانتظام علـى مسـاحة قـاع العمود A ، وعليه فإن الضغط عند القاع يكون :

$$P=\frac{F}{A}=\frac{\text{الوزن}}{A}=\frac{\rho Vg}{A}$$



شكل 10-9 :
الضغط النــاتج عـن عمـود مـن المـائع $P=\rho gh$ على عمق h تحت السطح .

ولكن حجم المائع V يساوى حجم أسطوانة منتظمة قائمة مسـاحة مقطعـها A وارتفاعـها h ، أى أن $V=Ah$. إذن ، بالتعويض عـن V بـهذه الكميـة فـى المعادلـة السـابق نجـد أن الضغط على عمق قدره h تحت سطح مائع نتيجة لوزن هذا المائع هو :

$$P=\frac{\rho Ahg}{A}=\rho gh \tag{9-11}$$

4 ـ إذا سببت قوة خارجية ما زيادة في الضغط عند أى نقطة في مائع محبوس غير قابل للانضغاط فإن الضغط يزداد عند كل نقط المائع بنفس المقدار . وتعرف هذه الحقيقة باسم مبدأ باسكال .

فمثلاً ، إذا وضع مائع في وعاء مفتوح كما هو مبين بالشكل 10–9 سوف يقع السطح العلوى للمائع تحت تأثير الضغط الجوى P_a إلى أسفل ، وينص مبدأ باسكال على أن الضغط عند كل نقطة بالمائع يزداد بنفس هذا المقدار . يمكننا إذن القول أن الضغط الكلى على عمق h في المائع يعطى بالعلاقة :

$$P = P_a + \rho g h$$

عندما نستخدم مقياس الضغط لقياس الضغط داخل وعاء فإننا نفعل ذلك عادة بينما يحيط الضغط الجوى P_a بنا وبالمقياس في نفس الوقت . ما يقوم مقياس الضغط بقياسه هو في الواقع الفرق بين الضغط في الوعاء والضغط الجوى P_a . ويعرف هذا الفرق بين الضغط الكلى داخل الوعاء والضغط المحيط P_a **بمدلول مقياس الضغط** ، وسوف نرمز له بالرمز P_G . إذن :

$$P_G = P - P_a \tag{9–12}$$

وعليه فإن مدلول مقياس الضغط على عمق h في مائع مفتوح على الجو هو :

$$P_G = P - P_a = \rho g h$$

هذا ويعتبر مبدأ باسكال الأساس النظرى لعمل الروافع والمكابس الهيدروليكية وكذلك أنظمة الفرامل الهيدروليكية ، وسوف نتناول هنا بعض الأمثلة بالدراسة .

5 ـ يتساوى الضغط في مائع ساكن عند جميع النقط التى تقع على نفس العمق .

هذه نتيجة طبيعية طبقًا للعبارة 3 لأننا لم نحدد أى موضع أفقى معين في المائع عند اشتقاق العلاقة $P_G = \rho g h$. وبناء على ذلك فإن أسطح المائع الساكن في مجموعة من الأوانى المستطرقة المفتوحة يجب أن تكون جميعها في نفس المستوى (شكل 11–9) .

بعد أن تعرفنا على هذه الحقائق الخمس يمكننا الانتقال إلى بعض التطبيقات .



شكل 11–9 :
عند اتزان سائل في مجموعة من الأوانى المستطرقة المفتوحة تقع أسطح السائل في هذا الأوانى على نفس المستوى .

مثال توضيحى 2–9

الجهاز الموضح بالشكل 12–9 نسخة من مكبس هيدروليكى . إذا أثرت قوة مقدارها F_1 على الكباس الأول (ومساحته A_1) فما مقدار القوة المؤثرة F_2 على الكباس الآخر (ومساحته A_2) واللازمة للاتزان مع F_1 ؟

استدلال منطقى :

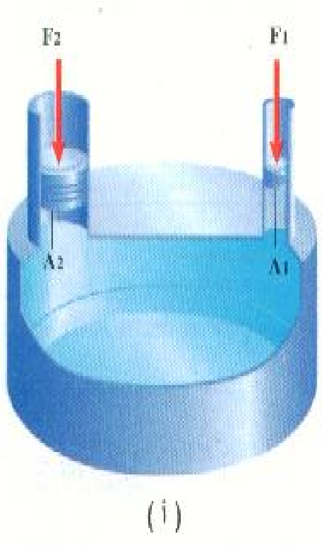
الضغط الناتج عن تأثير القوة F_1 على A_1 هو $P = F_1 / A_1$. وطبقًا لمبدأ باسكال فإن هذا

الضغط يؤثر في جميع نقط السائل ، بما فيها السطح A_2 . إذن ، الضغط عند الكباس الكبير يكون $P = F_1 / A_1$ ، ولهذا يمكن كتابة المعادلة الآتية :

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى F_2 نحصل على :

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \tag{9-13}$$



(أ)



(ب)

شكل 12-9 :
مبدأ المرفاع الهيدروليكى . (أ) تستطيع قوة صغيرة مؤثرة على الكباس الصغير رفع ثقل كبير على الكباس الكبير . (ب) يخلق الضغط فى السائل الهيدروليكى باستعمال مضخة (غير ظاهرة فى الصورة) . هذا الضغط ينتقل خلال الخطوط الهيدروليكية إلى الكباسات الشغالة . تضاعف الكباسات الهيدروليكية الكبيرة الضغط الناتج عن المضخة ، مما يمكن مخلب العزاقة من بذل قوى كبيرة جدًا .

أى أن القوة المسلطة تتضاعف بمقدار النسبة بين المساحتين . ويعتبر المكبس الهيدروليكى أحد أمثلة الروافع ؛ والرافعة جهاز يمكننا من رفع أوزان كبيرة جدًا باستخدام قوى متوسطة القيمة .

من المهم أن نعى جيدًا أن مضاعفة القوة في الجهاز الهيدروليكى لا تعنى بحال من الأحوال أن الجهاز يضاعف الشغل المبذول . هذا نقض صارخ لمبدأ بقاء الطاقة . ولكى نرى أن $W_{in} = W_{out}$ (بإهمال قوى الاحتكاك) سوف نبدأ باستخدام تعريف الشغل :

$$W_{in} = F_1 h_1 \qquad \text{و} \qquad W_{out} = F_2 h_2$$

حيث h_1 ، h_2 المسافاتان اللتان يقطعهما الكباسان . بناء على ذلك فإن النسبة بين مقدارى الشغل هى :

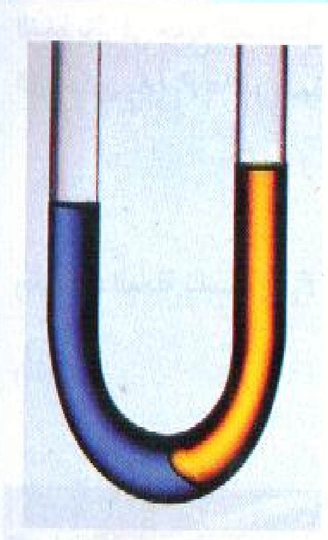
$$\frac{W_{in}}{W_{out}} = \frac{F_1 / F_2}{h_1 / h_2} = \frac{A_1}{A_2} \frac{h_1}{h_2} \tag{9-14}$$

تذكر أن النسبة بين القوتين تعطى بالمعادلة (9-13) . والآن ما معنى **عدم القابلية للانضغاط (أو اللاانضغاطية)** ؟ معنى ذلك أن حجم أى عنصر من المائع لا يتغير ، فأى حجم من المائع يزيحه أحد الكباسين لابد أن ينتقل إلى الآخر . فإذا كان $V_1 = A_1h_1$ هو الحجم المزاح فى الكباس 1 وكان $V_2 = A_2h_2$ هو الحجم المزاح فى الكباس 2 فإن اللاانضغاطية تحتم أن يكون :

$$A_1h_1 = A_2h_2 \qquad \text{أو} \qquad \frac{A_2}{A_1} = \frac{h_2}{h_1}$$

وباستعمال هذا الشرط فى المعادلة 14-9 نجد أن :

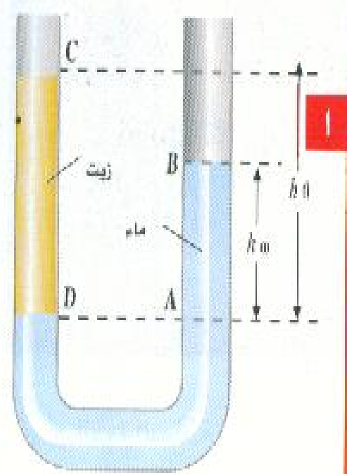
$$\frac{W_{in}}{W_{out}} = 1$$



اتزان الزيت (اللون البرتقالى) والماء (اللون الأرجوانى) فى أنبوبة على شكل الحرف U . ونظرًا لأن الزيت أقل كثافة من الماء ، يجب أن يكون طول عمود الزيت أكبر من طول عمود الماء ليكون ضغطاهما متساويين عند السطح الفاصل .

مثال 2-9 :

وضع الماء والزيت فى فرعى أنبوبة زجاجية على شكل الحرف U كما بالشكل 13-9 . إذا كان السائلان فى الشكل فى حالة سكون ، ما قيمة كثافة الزيت ؟



شكل 13-9 :
يمكن تعيين كثافة الزيت لأن الماء فى العمود BA متزن مع الزيت فى العمود CD .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو شرط اتزان السائلين ؟

الإجابة : النقطة الحاسمة هى السطح الفاصل بين الزيت والماء (النقطة D فى الشكل 13-9) . وإذا كان السائلان ساكنين فذلك يعنى أن القوة التى يؤثر بها الزيت على السطح الفاصل إلى أسفل تساوى القوى المؤثرة عليه بواسطة الماء إلى أعلى .

سؤال : هل يعنى هذا أن ضغطى السائلين أحدهما على الآخر متساويان عند السطح الفاصل ؟

الإجابة : الاتزان يعنى توازن القوتين . وحيث أن السائلين يشتركان فى نفس المساحة ، وحيث أن $P = F / A$ ، ينتج من ذلك أن الضغطين متساويان .

سؤال : ما تأثير الضغط الجوى ؟

الإجابة : كلا طرفى الأنبوبة مفتوحان ، ومن ثم فإن P_a يؤثر على كلا السائلين وتكون محصلة تأثير P_a على النظام صفرًا ، وهكذا فإن شرط الاتزان فى هذه الحالة هو تساوى مدلولى ضغط القياس عند D .

سؤال : ما قيمة الضغط عند D نتيجة للزيت ؟

الإجابة : مدلول ضغط القياس هو : $P_{oil} = \rho_{oil} g h_0$.

سؤال : ما قيمة الضغط عند D نتيجة للماء ؟

الإجابة : حيث أن D تقع على نفس مستوى A فإن ضغط الماء متساوى عند D و A . أى مدلول ضغط القياس يكون $P_w = \rho_w g h_w$.

الفيزيئيون يعملون : باتريك هاميل   جامعة سان جوزيه الحكومية



بدأت دراستي في الكلية كطالب بشعبة اللغة الإنجليزية ، فقد كان في أعماقي إحساس غامض أنني سأكون كاتب أعظم رواية أمريكية أو ، على الأقل ، أني سأحيا حياة بوهيمية في غرفة علوية بسيطة في باريس . حسنًا ، ولكن رائد الفصل أخبرني أنه حتى طلاب اللغة الإنجليزية يتحتم عليهم دراسة أحد المقررات العلمية ، واقترح على مقرر الفيزياء 12 وهو مقرر مشهور بين الطلاب باسم « السمكرى الدمية الثانى عشر » . ولأنني كنت طالبًا متميزًا إلى حد ما في الرياضيات فقد اقترحت على الرائد أن يسجلني في مقرر أكثر تحديًا . وبابتسامة بغيضة رد الأستاذ قائلًا « بالتأكيد » وقام بتسجيلي في مقرر الفيزياء لشعبتي الفيزياء والهندسة .

لا أدرى لماذا ، ولكنني استمتعت حقيقة بهذا المقرر . كان من بين ما أسرني بصورة خاصة في الفيزياء أن النظام الفيزيائي ، كالكرة المتدحرجة إلى أسفل على مستوى مائل ، يمكن وصفه بالمعادلات الرياضية ، وهذا ما يسمى « إعداد نموذج » للنظام الفيزيائي ، أو « نمذجة » النظام الفيزيائي . وفي الوقت الحالي يتطلب إعداد النموذج كتابة برنامج كومبيوتر معقد وتشغيله على كومبيوتر عملاق وليس مجرد استخدام الرياضيات في حل عدد من المعادلات الرياضية البسيطة ، ولكن الفكرة واحدة . وأنا مازلت إلى الآن أعمل في حقل إعداد النماذج لحساب الهيئة القومية للطيران والفضاء NASA • ؛ وهذه النماذج خاصة بتحليل ثقب الأوزون . كذلك فإني أقوم بتدريس الفيزياء بجامعة سان جوزيه الحكومية ؛ حيث أدرس هذه المادة غالبًا لطلاب الفيزياء المستجدين ــ لنفس الفصل الذى بدأت أنا منه ، والذى يعتبر واحدًا من فصولى المفضلة .

ربما تعلم أن هناك طبقة من الهواء الغنى بالأوزون في طبقات الجو العليا التى تقع على ارتفاع يتراوح بين 20 و 50 كيلو مترًا . هذه الطبقة تغطى الأرض كطبقة من السحب غير المرئية . وإذا نظرت إلى السماء في يوم غائم فإنك ترى أحيانًا ثقبًا في طبقة السحب تظهر السماء خلاله صافية . وعندما نظر العلماء إلى السماء في القارة القطبية الجنوبية ولم يروا أوزونًا فوق رؤوسهم أطلقوا على هذه الظاهرة اسم « ثقب الأوزون » لتشابهه مع الثقب الموجود في طبقة السحاب .

ولاكتشاف ثقب الأوزون قصة ممتعة . كانت الحكومة البريطانية تقدم الدعم المالى طوال عدة سنوات لمجموعة صغيرة من العلماء الذين يعسكرون في منطقة قارسة البرد في القارة القطبية الجنوبية لقياس كمية الأوزون في الجو . وقد لاحظ هؤلاء العلماء ابتداء من حوالى عام 1975 سلوكًا غريبًا للأوزون فوق القارة القطبية الجنوبية ، إذا وجدوا أن كمية الأوزون في كل أكتوبر أقل منها في أكتوبر السابق ! هذا السلوك مستمر حتى الآن ، بل إن الأوزون يختفي الآن تمامًا في أكتوبر على ارتفاعات معينة فوق القارة القطبية الجنوبية .

كان ثقب الأوزون لغزًا محيرًا يتطلب حله تضافر جهود الفيزيائيين وعلماء الظواهر الجوية وبعض المهندسين . لم يكن هذا لغزًا خياليًا في فيلم بوليسى رخيص ، ولكنه لغز يهدد حياة البشرية ويجب حله . ويعتقد الكثيرون في الحقيقة أن فهم ثقب الأوزون هو أهم مشكلة اجتماعية علمية تواجه المجتمع الصناعى حاليًا .

الأوزون هو جزئ يتكون من ثلاث ذرات من الأكسجين ، ورمزه الكيميائى O_3 . ويوجد الأكسجين في الجو عادة على صورة الأكسجين الجزيئى O_2 . ولكن يحدث عند الارتفاعات العالية جدًا في الغلاف الجوى أن يمتص O_2 الأشعة فوق البنفسجية

• National Aeronautics ans Space Adminstration

من ضوء الشمس ، وهذا يؤدى إلى كسر الرابطة بين ذرتى الأكسجين ، وعندئذ تتحد بعض ذرات الأكسجين المنفردة مع جزيئات الأكسجين لتتكون بذلك جزيئات الأوزون . وتتلخص أهمية الأوزون فى أنه يمتص الضوء فوق البنفسجى . والواقع أن أهميته فى هذا الشأن مزدوجة لأن امتصاص الضوء فوق البنفسجى يتم فى كلا عمليتى إنتاج وهدم الأوزون . ويوجد فى الواقع اتزان دقيق بين إنتاج وهدم الأوزون ، ولهذا فإن مستويات الضوء فوق البنفسجى على سطح الأرض محتملة تمامًا . وتتضح خطورة الضوء فوق البنفسجى على حياة الإنسان فى أنه يسبب اسمرار البشرة وأحيانًا حروق الشمس ، بل قد يسبب أيضًا سرطان الجلد . فإذا لم يكن الأوزون موجودًا سيصبح سطح الأرض كله مغمورًا فى حمام من الضوء فوق البنفسجى مما قد يودى بحياة الكائنات الحية جميعها . من الواضح إذن أن أى تغير عنيف فى طبقة الأوزون لابد أن يعالج باعتباره تهديدًا خطيرًا للبشرية .

كانت الأسئلة الأساسية فى موضوع ثقب الأوزون كما يأتى : لماذا يختفى الأوزون ؟ ولماذا فى القارة القطبية الجنوبية ؟ ولماذا فى أكتوبر فقط ؟ وسرعان ما أجيب عن السؤال الأول . الأوزون يختفى لأن الناس يطلقون المركبات الكلورفلوركربونية (CFCs للاختصار) فى الجو . والواقع أن CFCs مركبات نافعة للغاية إذ يستخدم بعضها كسوائل وغازات تبريد فى الثلاجات ، وبعضها الآخر فى صناعة الأطباق والأكواب الرغوية ، كما يستخدم العديد منها فى العمليات الصناعية كصناعة رقائق الكومبيوتر . وتعتبر مركبات CFCs خاملة كيميائيًا ، ولكن الضوء فوق البنفسجى عند الارتفاعات العالية جدًا يسبب تكسيرها وتحرير ذرات الكلور . وقد اتضح أن الكلور قاتل للأوزون ، فذرة الكلور الواحدة يمكنها تدمير حوالى مليون من جزيئات الأوزون .

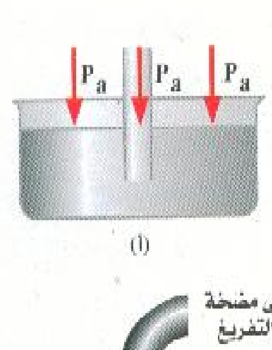
وهكذا فإن CFCs هى البطل الشرير فى لغز الأوزون . ولكن لماذا القارة القطبية الجنوبية ؟ حسنًا ، هنا يدخل بحثى فى الصورة ، لقد عملت لسنوات مع علماء NASA فى دراسة بيانات الأقمار الصناعية فلاحظنا ظاهرة هامة - لاحظنا ظهور ضباب أو سحاب غير كثيف كل شتاء على ارتفاعات عالية فوق القارة القطبية الجنوبية . (تذكر أن الشتاء فى القارة القطبية الجنوبية يكون فى يونيو ويوليو وأغسطس) . وكما قد تتوقع فإن درجة الحرارة على ارتفاع عشرين كيلو مترًا فوق القارة القطبية الجنوبية تكون منخفضة جدًا فى الشتاء ويمكن أن تصل إلى تسعين درجة مئوية تحت الصفر ، وهذه أبرد منطقة فى الجو . وكما أوضح صديقى بريان تون من NASA ، إن هذه المنطقة باردة بدرجة كافية لتكثيف حمض النيتريك من الجو وتكوين هذه السحب . سحب من حمض النيتريك ؟ كانت الفكرة مثيرة لدرجة أن NASA قررت إرسال طائرة أبحاث من طراز ER-2 محملة بالأجهزة إلى طرف أمريكا الجنوبية لتطير من هناك فوق القارة القطبية . وبالفعل ، كانت سحب حمض النيتريك موجودة هناك !

ولكن ما علاقة سحب حمض النيتريك باختفاء الأوزون فى أكتوبر ؟ الإجابة هى أن تلك السحب التى تتكون فقط فى الشتاء القطبى الجنوبى تمتص حمض النيتريك ، مغيرة بذلك تركيب الهواء من حولها . بعد ذلك تعمل هذه السحب كمصانع كيميائية دقيقة وتحول المواد الكلورية إلى فصائل نشطة تدمر الأوزون . وفى نهاية الأمر تسقط قطيرات حمض النيتريك إلى ارتفاعات أقل لتزيل المركبات النيتروجينية تاركة الجو فى حالة صالحة لحدوث إفراغ أوزونى . وبنهاية الليل الطويل بالقارة القطبية الجنوبية تبدأ الشمس فى السطوع على هذا الهواء « المعالج » ويبدأ الإفراغ الأوزونى ، وبحلول شهر أكتوبر لن يتبقى عمليًا أى أوزون فى المنطقة التى تكونت فيها السحب الاستراتوسفيرية القطبية .

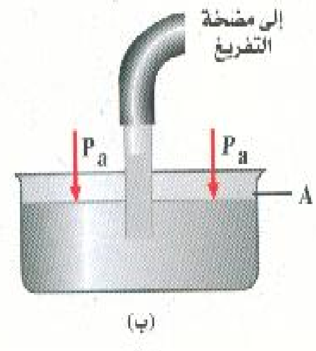
إن حل لغز كيفية تكون ثقب الأوزون لا يعنى أن المشكلة قد حلت ؛ فعلى الحكومات ورجال الصناعة وكافة المواطنين أن يتعاونوا من أجل بقاء طبقة الأوزون الحامية فى مكانها . ومع هذا فإن حل اللغز يمثل الخطوة الأولى الحاسمة فى هذا الاتجاه .

إن مجال أبحاثى فى منتهى الإثارة ؛ وأعتقد أنه لشىء عظيم أن يقوم الإنسان بعمل يمتعه هو شخصيًا ويمثل أهمية كبيرة للبشرية فى نفس الوقت . وإنى أظن الآن أن رائدى الدرسى الذى سجلنى فى مقرر الفيزياء « الصعب » قد فعل حقيقة معروفًا عظيمًا .

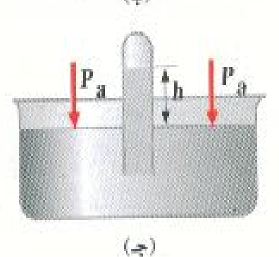
يستخدم **البارومتر** لقياس الضغط الجوى . وهناك أنواع عديدة من الأجهزة المستخدمة لهذا الغرض ، ولكن البارومتر الزئبقي هو أهم هذه الأجهزة على الإطلاق .
ويمكننا فهم مبدأ عمل هذا الجهاز بالرجوع إلى الشكل 14-9 فى الجزء (أ) نرى أنبوبة مفتوحة وقد غمرت جزئيًا فى كأس من الزئبق . وحيث أن ضغط الهواء خارج الأنبوبة يساوى ضغط الهواء داخل الأنبوبة فإن مستوى الزئبق سيكون واحدًا داخلها وخارجها .



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 14-9 :
عند تفريغ الأنبوبة يرتفع الزئبق حتى يصبح $\rho gh = P_a$. وعليه فإن هذا الجهاز ، وهو بارومتر ، يستطيع قياس الضغط الجوى .

لنفرض الآن أننا استعملنا مضخة لتفريغ الهواء من الأنبوبة ، كما فى الشكل 14-9ب ، ثم قمنا بلحامها كما فى الجزء (جـ) . وما أن يضخ كل الهواء من الأنبوبة سيصبح الضغط على سطح الزئبق داخلها صفرًا . (تذكر أن ضغط الغاز على سطح ينشأ نتيجة لتصادم جزيئات الغاز مع السطح . وإذا لم توجد أى جزيئات من الهواء سيكون لدينا فراغ مثالى ويكون الضغط صفرًا) . وهكذا فإن الضغط على مستوى النقطة A داخل الأنبوبة يعزى فقط إلى ارتفاع عمود الزئبق h فى الأنبوبة ويساوى ρgh ، حيث ρ كثافة الزئبق . لاحظ أن الضغط على مستوى النقطة A خارج الأنبوبة ما زال هو الضغط الجوى P_a . علاوة على ذلك تفيدنا العبارة 5 بالقسم 4-9 أن الضغط داخل الأنبوبة على مستوى النقطة A يساوى نفس الضغط خارجها . إذن :



الضغط عند A داخل الأنبوبة = الضغط عند A خارج الأنبوبة

$$P_a = \rho gh \qquad (9\text{–}14)$$

نرى من ذلك أن الضغط الجوى يستطيع حمل عمود من الزئبق يعطى ارتفاعه بالمعادلة (9-15) . ولإيجاد طول عمود أى سائل يستطيع الجو أن يحمله يلزمنا فقط استخدام كثافة هذا السائل فى المعادلة (9-15) .

طول عمود الزئبق المناظر للضغط الجوى القياسى (لثلاثة أرقام معنوية) هو :

$$h = \frac{1.01325\times10^5 \text{ Pa}}{(13.6\times10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)}$$

$$= 0.760 \text{ m} = 760 \text{ mm}$$

وهذا يساوى 29.9 in . وربما تكون قد سمعت فى تقارير الطقس أن الضغط البارومترى 30 in أو 670 mm تقريبًا .



عند تفريغ الهواء من علبة معدنية مغلقة يتسبب الضغط الجوى عليها من الخارج فى تدميرها .

يجدر بنا أن ننوه فى هذه النقطة إلى أن هناك وحدتين شائعتين لقياس الضغط . الأولى تسمى تور ، نسبة إلى مخترع البارومتر وهو الفيزيائى الإيطالى إيفانجليستا توريشيللى (1608-1647) . أما الوحدة الأخرى ، وهى البار ، فتستخدم فى علم الميتيورولوجيا (علم الظواهر الجوية) . وقيمة كل من هاتين الوحدتين كالتالى :

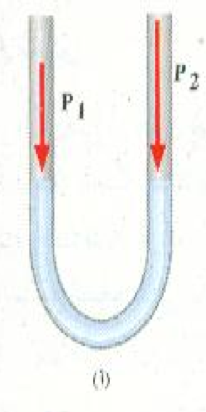
$$1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg} = (1/760) \text{ atm}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \quad \text{(بالضبط)}$$

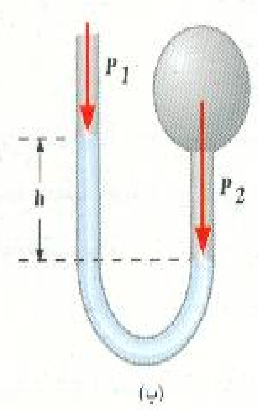
البار الواحد إذن يساوى الضغط الجوى النموذجى تقريبًا ، وتقاس التغيرات فى الضغط الجوى نتيجة للتقلبات الجوية عادة بالملى بارات .

تتميز البارومترات التجارية بكونها أكثر تهذيبًا من الجهاز البسيط الموضح بالشكل 15-9 ، فهي مزودة بتدريج دقيق بجانب عمود الزئبق وأجهزة خاصة لتعديل مستوى الزئبق بالكأس . هناك كذلك أنواع أخرى من البارومترات المصممة على أساس مبادئ مختلفة ، ولكن البارومترات الزئبقية تفضل دائمًا في القياسات الدقيقة . ومع ذلك فإن طول الجهاز يجب أن يكون 76 cm على الأقل (لماذا ؟) ، ولكن قد تدعو الحاجة إلى استبداله بجهاز أصغر ، ولكنه أقل دقة .

هناك جهاز آخر يستخدم كثيرًا لقياس ضغوط الغازات وهو **المانومتر** (شكل 15-9) هذا الجهاز يوجد في صور عديدة ، ولكن المانومتر يتكون أساسًا من أنبوبة على شكل الحرف U مملوءة جزيئًا بسائل ما ، وهو الزئبق غالبًا . وعندما يكون مستوى سطح الزئبق في فرعي الأنبوبة واحدًا ، كما هو مبين بالجزء (أ) من الشكل ، فهذا يعني أن ضغطي الغازين P_1 و P_2 فوق العمودين متساويان . أما إذا كان P_2 أكبر من P_1 فسيكون الوضع كما هو مبين بالجزء (ب) من الشكل .



(أ)

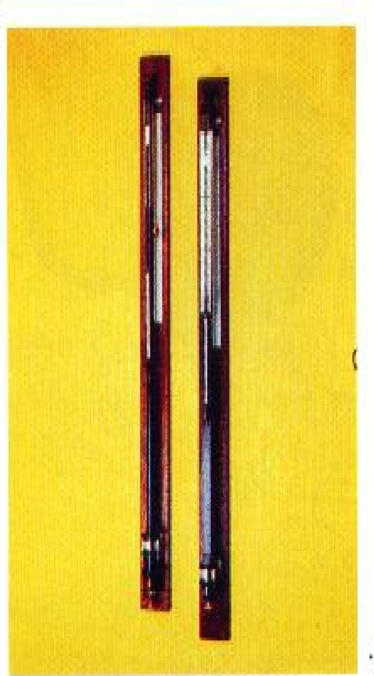


(ب)

شكل 15-9 : (ب)
يقاس فرق الضغط $P_2 - P_1$ بدلالة الفرق بين الارتفاعين h في فرعي المانومتر .

وهكذا فإن الفرق بين الارتفاعين h ، مقاسات بالمليمترات ، يعطينا فوق الضغط $P_2 - P_1$ بالتور مباشرة طالما كان الزئبق هو السائل المستخدم . وعندما يكون العمود 1 مفتوحًا على الجو فسوف يمثل القياس مدلول ضغط المقياس في الفرع 2 . وطبقًا لتعريف h كما هو مبين بالشكل 15-9(ب) ، عندما يكون P_2 أقل من P_1 فإن h سيكون سالبًا . وعليه فإذا كان مدلول ضغط المقياس سالبًا فإن هذا يعني أن الضغط في الوعاء أقل من الضغط الجوي المحيط .

لقياس فروق صغيرة في الضغط يجب استعمال سائل أقل كثافة من الزئبق ، وعندئذ سوف يزداد الارتفاعان بنسبة قدرها $13,600/\rho$ ، حيث ρ كثافة السائل المستخدم بدلاً من الزئبق مقدرة بالوحدات SI . لاحظ أنه إذا استخدم الماء كسائل مانومتري لقياس الضغط الجوي P_a فإن طول عمود الماء سيكون عندئذ $(76\ \text{cm})(13,600/1000) = 1034\ \text{cm}$ تقريبًا ، وهو بالتقريب ارتفاع مبنى من ثلاثة طوابق .



مانومتر زئبقي .

مثال 3-9 :

فى أحد الاختبارات البسيطة للرئتين يطلب من الشخص أن ينفخ بكل قوته فى أحد فرعي مانومتر كما هو مبين بالشكل 16-9 . لنفرض أن مانومترًا مائيًا قد استخدم فى هذه الحالة فكان الفرق بين مستويى الزئبق 80.0 cm كما بالشكل . ما قيمة الضغط داخل الرئتين ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يعنى أن الفرق بين مستويى الماء 80.0 cm ؟

الإجابة : هذا القيمة تمكننا من حساب مدلول ضغط المقياس ، $P_G = \rho g h$ ، حيث ρ كثافة الماء و $h = 80.0\ cm$.

سؤال : ما هو الضغط الكلى داخل الرئتين ؟

الإجابة : $P_{tot} = P_G + P_{atm}$ ، ونحتاج إلى معرفة قيمة الضغط الجوى المحيط لحساب P_{tot} . فإذا فرضنا أن هذا الضغط يساوى 1 atm ؛ فإن :

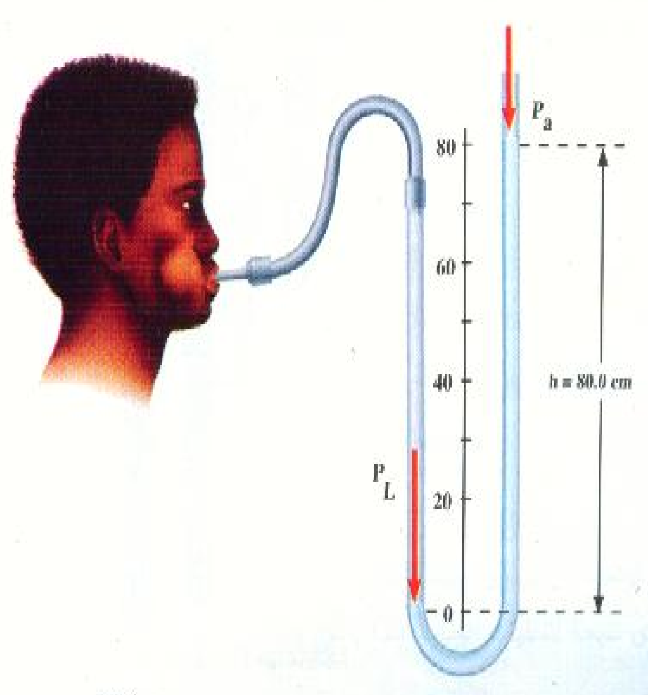
$$P_{tot} = P_G + 1.01 \times 10^5\ Pa$$

الحل والمناقشة : يجب أن نفهم أن P_{atm} لا يساوى دائمًا 1 atm . وعليه يجب قياس القيمة الفعلية للضغط P_{atm} فى الغرفة التى تجرى بها التجربة فى كل حالة . مدلول ضغط المقياس هو :

$$P_G = (1.00 \times 10^3\ kg/m^3)(9.80\ m/s^2)(0.800\ m) = 7.84 \times 10^3\ Pa$$

وعليه ؛ فإن الضغط الكلى يكون :

$$P_{tot} = (101 + 7.84) \times 10^3\ Pa = 109 \times 10^3\ Pa$$



شكل 16-9 :
يستطيع الشخص أن يتحمل عمودًا من السائل ارتفاعه 80.0 cm . ما قيمة P_L ؟

تمرين : مانومتر يستخدم فيه الزيت ($\rho = 840\ kg/m^3$) كسائل مانومترى يقرأ فرقًا بين مستويى الزيت فى فرعيه مقداره $7.31\ cm$. ما قيمة هذا الفرق بالوحدات SI وبالسنتيمترات من الزئبق ؟ **الإجابة** : $4.53 \times 10^{-4}\ cmHg$ ، $0.602\ Pa$

مثال 9-4 :

غاص هلب من الصلب المصمت إلى قاع واحد من أعمق الأخاديد فى المحيط إلى عمق قدره $6.90\ mi$ تحت السطح . احسب التغير فى كثافة الهلب المصنوع من الصلب نتيجة لضغط الماء .

استدلال منطقى :

سؤال : لماذا تتأثر الكثافة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : الكثافة = الكتلة / الحجم . وكتلة الهلب تظل ثابتة ، ولكن الحجم سوف يقل بسبب ضغط الماء .

سؤال : ما الذى يربط التغير فى الحجم بالضغط المؤثر ؟

الإجابة : معامل المرونة الحجمية للصلب : $\Delta V/V_0 = -\Delta P/B$.

سؤال : ما قيمة ΔP فى هذه الحالة ؟

الإجابة : ΔP يمثل الفرق بين الضغط الجوى على الهلب عند مستوى سطح البحر والضغط الكلى عليه فى قاع المحيط . بأسلوب آخر ، ΔP هو مدلول ضغط المقياس $\rho g h$ الناتج على عمق h قدره $6.9\ mi$ من ماء البحر .

سؤال : بعد إيجاد $\Delta V/V$ ، كيف يمكن ربطه بالتغير فى الكثافة $\Delta\rho$ ؟

الإجابة : بفرض أن كتلة الهلب m يمكن كتابة الكثافة الأصلية على الصورة $\rho_0 = m/V_0$. وبذلك تكون الكثافة عند وجول الهلب تحت الماء $\rho = m/V$ ، حيث $\Delta V = V - V_0$.

الحل والمناقشة : مدلول ضغط المقياس المناظر لعمق قدره $6.90\ mi$ من ماء البحر هو :

$$P_G = (1.025 \times 10^3\ kg/m^3)(9.80\ m/s^2)(6.90\ mi)(1610\ m/mi)$$

$$= 1.12 \times 10^8\ Pa = 1100\ atm$$

معامل المرونة الحجمية للصلب يساوى $16 \times 10^{10}\ N/m^2$. ومن ثم فإن التغير فى الحجم الناتج عن زيادة الضغط بمقدار مدلول ضغط المقياس يعطى بالعلاقة :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{-\Delta P}{B} = \frac{-(1.12 \times 10^8\ Pa)}{16 \times 10^{10}\ N/m^2}$$

$$= -7.00 \times 10^{-4}$$

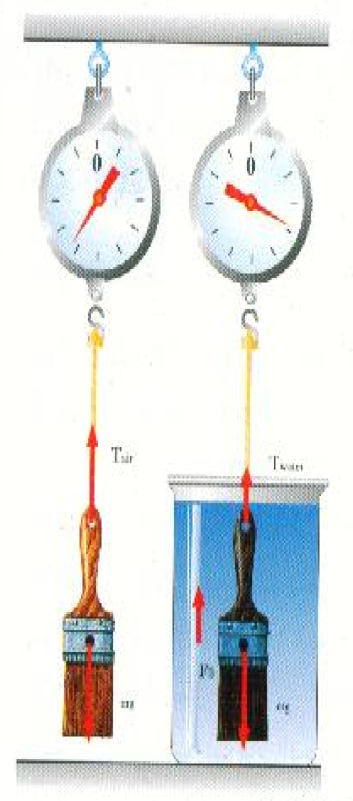
لاحظ أن P_a تختصر مع N/m^2 . إذن ، الحجم الجديد يكون :

$$V = (1.0000 - 0.0007)V_0 = 0.9993\ V_0$$

وبذلك تكون الكثافة الجديد هى :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{0.9993V_0} = \frac{\rho_0}{0.9993} = 1.0007\rho_0$$

أى أن هذه الزيادة فى الضغط تسبب زيادة الكثافة بمقدار 0.07 فى المائة فقط .



شكل 17-9 :
يؤثر الماء على الفرشة بقوة الطفو F_B إلى أعلى . ويقرأ الميزان T_{air} عندما تكون الفرشة فى الهواء ويقرأ T_{water} عندما تكون فى الماء .

9-6 مبدأ أرشميدس ؛ الطفو

ربما تكون التجربة الموضحة بالشكل 17-9 جديدة بالنسبة إليك ، وهى توضح الحقيقة المشهورة بأن الأجسام تبدو أقل وزنًا عندما تكون مغمورة فى سائل . وإذا كنت قد حاولت مرة أن تحمل شخصًا فى حمام سباحة فإنك تعلم تمامًا أن القوة اللازمة لحمله أقل كثيرًا من وزنه . وبالمثل فإن القوة الحاملة T فى الشكل 17-9 تكون أقل عندما تكون الفرشة مغمورة فى الماء . يبدو إذن أن الماء يؤثر على الفرشة بقوة معينة F_B إلى أعلى ، وسوف نسمى هذه القوة **بقوة الطفو** .

يعرف قانون الموائع الذى يصف قوة الطفو باسم **مبدأ أرشميدس** . وللوصول إلى هذا القانون لنتأمل الجسم الموضح بالشكل 18-9 . هذا الجسم يقع تحت تأثير قوة الطفو التى يؤثر بها السائل على الجسم . ومن الواضح أن محصلة تأثير قوى السائل المؤثرة على الجسم تتمثل فى قوة إلى أعلى مقدارها F_B . وتعتبر F_B أساسًا نتيجة منطقية لحقيقة أن الضغط يزداد مع العمق ، بحيث تكون القوة المؤثرة إلى أعلى على قاع الجسم أكبر من القوة المؤثرة إلى أسفل على قاع الجسم .

ولكى ترى مدى كبر قوة الطفو ، لاحظ ما يمكن أن يحدث إذا كان الجسم مصنوعًا من نفس مادة السائل ؛ وفى هذه الحالة لن يمكن تمييز الجسم عن السائل . وهكذا سوف يظل الجسم ساكنًا دون الحاجة إلى أى قوى لحمله . هذا يعنى أن مقدار F_B تكفى بالضبط لحمل الجسم فى هذه الحالة ، أى أن $F_B = mg$ ، حيث mg وزن الجسم المصنوع من السائل .

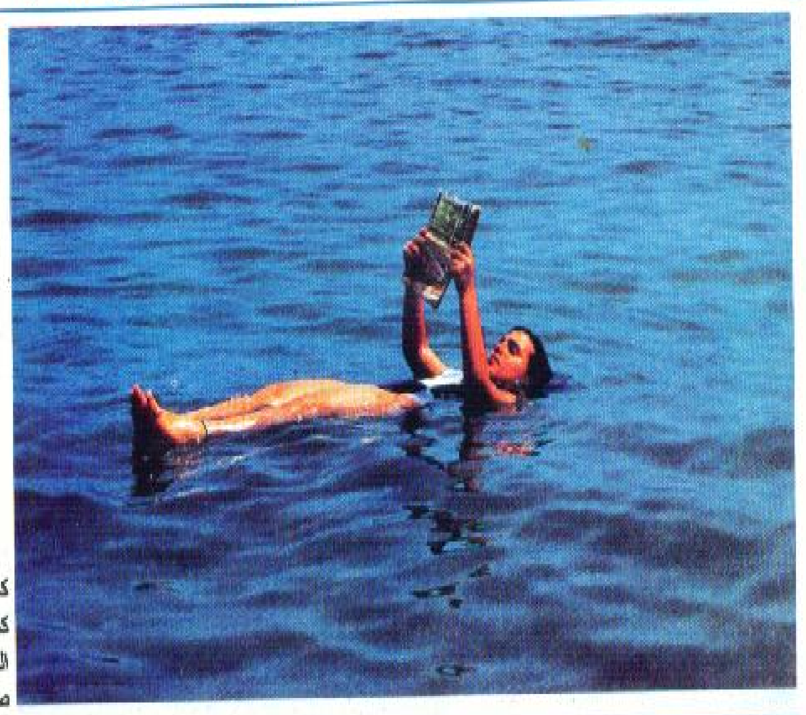
من الطبيعى ألا تعتمد قوة الطفو الناتجة عن السائل على مادة الجسم . وعليه فإن F_B تكون ثابتة دائمًا وتساوى وزن ذلك الحجم من السائل الذى يزيحه الجسم . بهذا نكون قد وصلنا إلى صيغة مبدأ أرشميدس :

إذا غمر جسم جزئيًا أو كليًا فى مائع فإنه يُدفع رأسيًا إلى أعلى بقوة تساوى وزن المائع الذى يزيحه الجسم .



شكل 18-9 :
بملذا يخبرنا مبدأ أرشميدس عن قوة الطفو المؤثرة على الجسم ؟

ويمكنك باتباع نفس هذا الأسلوب فى الاستدلال المنطقى أن ترى بنفسك أننا لم نستعمل حقيقة أن الجسم المبين بالشكل 18-9 مغمور كليًا .



كثافة الماء المالح فى البحر الميت أكبر من كثافة الماء العذب . ونتيجة لذلك تطفو السباحة على سطح الماء المالح مع أن جزءًا صغيرًا من جسمها فقط هو المغمور فيه .

مثال 9-5 :

افترض أن M هي كتلة الفرشة المبينة بالشكل 17–9 وأن ρ كثافتها . أوجد وزنها الظاهرى (قراءة الميزان الأيمن W_{app}) عندما تكون مغمورة في سائل كثافته ρ_f .

استدلال منطقى :

سؤال : ماذ تقيس قراءة الميزان ؟

الإجابة : إنها تقيس صافى القوة المؤثرة على الفرشة إلى أسفل ، وهو يمثل الفرق بين قوة الجاذبية إلى أسفل وقوة الطفو F_B إلى أعلى :

$$W_{app} = M_b\, g - F_B$$

الدليل السفلى b يعود على خواص الفرشة .

سؤال : على ماذا تعتمد F_B ؟

الإجابة : الفرشة مغمورة كليًا ، ومن ثم فإن F_B تساوى وزن السائل المزاح بواسطة حجم الفرشة كله .

سؤال : ما مقدار حجم الفرشة ؟

الإجابة : من تعريف الكثافة ، $V_b = M_b / \rho_b$. هذا يساوى أيضًا حجم السائل المزاح .

سؤال : ما وزن هذا الحجم من السائل ؟

الإجابة : $W_f = M_f g = \rho_f V_f g = \rho_f V_b g = F_B$

الحل والمناقشة : باستعمال كل هذه الأجزاء وكذلك العلاقة $M_b g = \rho_b V_b g$ نحصل على :

$$W_{app} = \rho_b V_b g - \rho_f V_f g = (\rho_b - \rho_f) V_b g$$

لاحظ ما يأتي :

1 ـ إذا كانت $\rho_f < \rho_b$ فإن صافي القوة يكون إلى أسفل ، وإذا حررت الفرشة فسوف تغوص في السائل .

2 ـ إذا كانت $\rho_f > \rho_b$ فإن صافي القوة يكون إلى أعلى ، وسوف ترتفع الفرشة خلال السائل إذا حررت .

3 ـ إذا كانت $\rho_f = \rho_b$ سيكون طفو الفرشة المغمورة متعادلاً ، ولن تغوص أو ترتفع .

مثال 9-6 :

كتلة تاج إحدى الملكات 1.30 kg . ولكن عند وزنه وهو مغمور كلية في الماء وجد أن كتلته الظاهرية 1.14 kg . هل التاج من الذهب المصمت ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما المفتاح لمعرفة ما إذا كان التاج من الذهب المصمت ؟

الإجابة : إذا كان التاج من الذهب المصمت فإن كثافته تساوي كثافة الذهب . أما إن كان مصنوعًا من خليط من المواد أو من مادة أخرى متجانسة أو كان مجوفًا فإن كثافته تكون مختلفة عن كثافة الذهب .

سؤال : كيف يمكن حساب الكثافة بدون قياس حجم التاج .

الإجابة : بتطبيق مبدأ أرشميدس واستعمال البيانات المعطاة . هذا ما فعلناه في المثال 9-5 . وبإعادة ترتيب نتيجة ذلك المثال سنحصل على :

$$W_{app} = W_c\left(1-\frac{\rho_f}{\rho_c}\right)$$

حيث ρ_c كثافة التاج ، W_c وزن التاج في الهواء .

سؤال : ما وزن التاج في الهواء ؟

الإجابة : $W_c = Mg = (1.30\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2) = 12.7\ \text{N}$

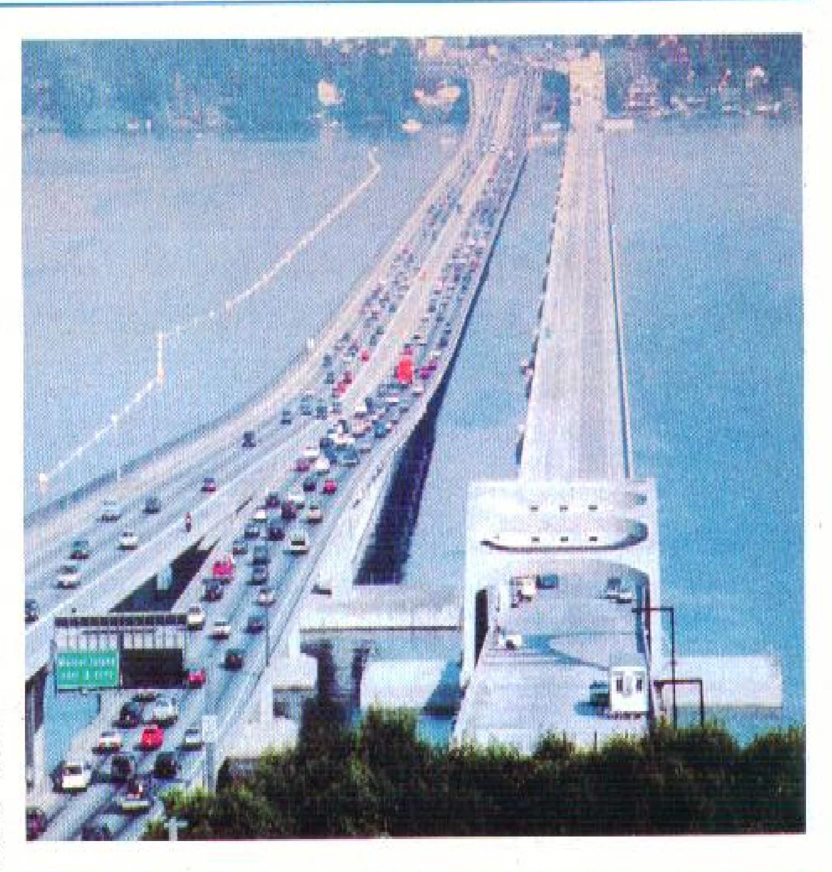
الحل والمناقشة : يمكن حل المعادلة السابقة بالنسبة إلى ρ_c :

$$\rho_c = \frac{\rho_f W_c}{W_c - W_{app}}$$

وبالتعويض بالقيم العددية للوزنين وكثافة الماء نجد أن :

$$\rho_c = \frac{(1.00\times10^3\ \text{kg/m}^3)(12.7\ \text{N})}{12.7\ \text{N}-(1.14\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)} = 8.31\times10^3\ \text{kg/m}^3$$

ولكن كثافة الذهب أكبر كثيرًا من هذه القيمة، $19.3\times10^3\ \text{kg/m}^3$. إذن ، التاج بالتأكيد ليس مصنوعًا من الذهب المصمت .



الخرسانة أكبر كثافة من الماء ، ومع هذا فإن هذه الكبارى الخرسانية تطفو وتحمل وزن كثير من السيارات . هل يمكنك تفسير ذلك ؟

مثال 7-9 :

الثلج يطفو على الماء لأن كثافته $0.92 \times 10^3\ kg/m^3$. ما هى النسبة الحجمية المغمورة تحت سطح الماء من قطعة ثلج طافية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الشرط الفيزيائى الذى يصف الطفو ؟

الإجابة : يقع الجسم الطافى تحت تأثير قوة تساوى وزنه ، ولهذا يظل الجسم فى حالة اتزان على سطح السائل .

سؤال : ما هى المعادلة التى تعبر عن هذا الشرط ؟

الإجابة : $F_B = Mg$ ، حيث F_B وزن الماء المزاح ، M كتلة الجسم الطافى .

سؤال : ما حجم الماء المزاح ؟

الإجابة : هذا الحجم يساوى حجم الجزء المغمور (وليس الحجم الكلى) من قطعة الثلج . لنرمز لهذا الحجم بالحرف V .

الحل والمناقشة : عند التعويض عن F_B بالكمية $\rho_w V_s g$ وعن M_{ice} بالكمية $\rho_{ice} V_{ice}$ تتحول معادلة الطفو إلى الصورة :

$$\rho_w V_s g = \rho_{ice} V_{ice} g$$

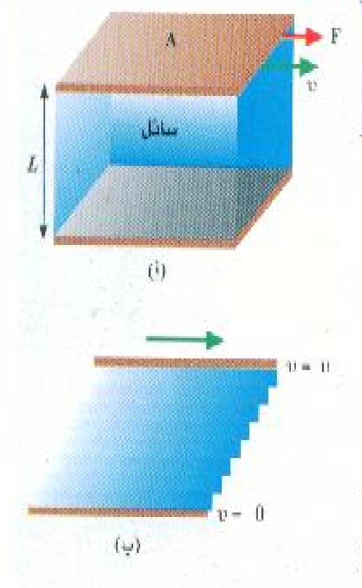
ومن ثم فإن النسبة الحجمية المغمورة من الجسم هى :

$$\frac{V_s}{V_{ice}} = \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} = \frac{0.92}{1.00} = 92\ \%$$

حقيقة إذن أننا نرى فقط قمة الجبل الجليدى .

9-7 اللزوجة وانسياب السوائل

عسل النحل والمولاس (العسل الأسود) مثالان لما يسمى **بالسوائل اللزجة** جدًا ، فهى تنساب ببطئ شديد عند صبها من إناء . أمـا الماء والكحـول ، وهـى سوائل أقل لزوجة بدرجة كبيرة ، فتنساب بحرية تامة . وتعرف خاصية مقاومة السوائل (والموائع عمومًا) **باللزوجة** . ولكى نحصل على معنـى كمـى للزوجـة سنسـتعين بتجربـة القص الموضحة بالشكل 19-9 . نحن نرى فى هذا الشكل لوحين متوازيين مساحة كـل منـهما A تفصلـهما مسافة قدرهـا L ؛ ولنفرض أن المنطقة بين اللوحين مملوءة بسـائل سنرمز للزوجية بالرمز η (الحرف اليونانى ايتـا) . عندمـا تؤثـر القوة الماسية F علـى اللوح العلوى سوف يتحرك هذا اللـوح بسرعة معينـة ولتكـن v بالنسبة إلى اللـوح السـفلى ، وبالطبع فإن القوة اللازمة لتحريك اللوح العلوى بهذه السرعة ستكون كبيرة كلما السـائل أكثر لزوجة . ويمكن وصف سرعة هذه الحركة القصية بما يسمى **معدل القص** للوحين والسائل الموجود بينهما :



شكل 19-9 :
عندما يتحرك اللوح العلوى تـنزلق طبقـات السائل فوق بعضها البعض . وتنشأ فواقـد الطاقة اللزجة بسبب قوى الاحتكاك المعوقـة لحركة هذه الطبقات .

جدول 4-9 : لزوجة بعض السوائل والغازات عند 30°C

المادة	اللزوجة (mPl) *
هواء	0.019
أسيتون	0.295
ميثانول (كحول ميثيلى)	0.510
بنزين عطرى	0.564
ماء	0.801
إيثانول(كحول إيثيلى)	1.00
بلازما الدم	~1.6
الزيت SAE رقم 10	200
جلسرين	629
جلوكوز	6.6×10^{13}

* 1 mPl = 10^{-3} Pa.s = 1 cP

$$\text{معدل القص} = \frac{\text{مقدار سرعة اللوح العلوى بالنسبة إلى السفلى}}{\text{المسافة بين اللوحين}} = \frac{v}{L}$$

وهكذا فإن الإجهاد القصى F/A المؤثر على اللوح العلوى يسبب معدل قص قدره v/L فى السائل .

تعرف لزوجة السائل η بأنها النسبة بين الإجهاد القصى ومعدل القص :

$$\eta = \text{اللزوجة} = \frac{\text{الإجهاد القصى}}{\text{معدل القص}} \qquad (9\text{-}16\text{أ})$$

وكما نرى فإن السائل الأكثر لزوجة يحتاج إلى إجهاد قصـى أكـبر لكـى ينسـاب بمعـدل قص معين .

وبدلالة التجربة الموضحة بالشكل 19-9 يمكننا أن نرى أن الإجهاد القصـى يسـاوى F/A وأن معدل القص يساوى v/L . وباستخدام هذه الكميـات المقاسـة يمكـن حسـاب لزوجة السائل :

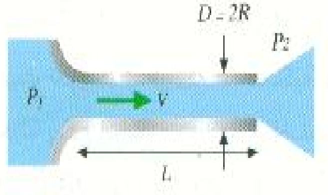
$$\eta = \frac{\text{الإجهاد القصى}}{\text{معدل القص}} = \frac{F/A}{v/L} \qquad (9\text{-}16\text{ب})$$

يمكننا أن نرى من معادلة التعريف أن الوحدات SI للزوجة هى الباسكال . ثانيـة (Pa . s) ؛

وقد أطلق اسم خاص لهذه الوحدة هو البوازيل (Pl) . ومن الوحدات الأخرى الشائعة الاستعمال لقياس اللزوجة نذكر البويز (P) ، حيث $1\ P = 0.10\ Pl$ ؛ وسنتيبواز (cP) . هذه الوحدة الأخيرة يمكن تذكرها بسهولة لأنها تساوى ملى بوازيل واحد : $1\ cP = 1\ mPl$. هذا ويتضمن الجدول 4–9 القيم النمطية للزوجة بعض السوائل .

يمكننا التعرف على معنى اللزوجة بصورة أكثر عمقًا بفحص الشكل 19–9ب . لاحظ أن طبقتى السائل الملامستين للوحين تظلان ملتصقتين بهما . علاوة على ذلك يمكننا اعتبار أن السائل الموجود بين اللوحين مكون من عدد كبير من الطبقات الرقيقة ، أكثر كثيرًا مما هو مبين بالشكل . وعندما يتحرك اللوح العلوى تنزلق هذه الطبقات كل منها على الأخرى ، ويكون الانزلاق أكثر صعوبة إذا كانت لزوجة السائل كبيرة ؛ وفى هذه الحالة تكون كمية الشغل اللازمة لحدوث القص فى السائل كبيرة .

يمثل انسياب الماء وغيره من السوائل الشبيهة به فى الأنابيب أو المواسير أهمية عملية خاصة ، وهذا ما سوف نراه فيما بعد . ولمناقشة الانسياب فى مثل هذه الأنابيب سوف نعرف **معدل الانسياب** بأنه حجم السائل Q المنساب فى الأنبوبة فى كل ثانية . فمثلاً عندما ينساب حجم قدره $50\ cm^3$ من الماء خارجًا من أنبوبة كالمبينة بالشكل 20–9 فإن $Q = 50\ cm^3/s$.



شكل 20–9 :
يعطى معدل السيلان خلال أنبوبة بقانون بوازيل . السرعة v هنا فى حالة $P_1 > P_2$.

إذا كان P_1 ، P_2 يمثلان ضغط السائل عند طرفى الأنبوبة الموضحة بالشكل 19–9 فإن $P_1 - P_2$ يسمى الضغط التفاضلى ؛ وكما هو متوقع فإن معدل الانسياب خلال الأنبوبة يتناسب مع الضغط التفاضلى فى حالة السوائل البسيطة . من المتوقع أيضًا أن يزداد معدل الانسياب كلما زاد نصف قطر الأنبوبة R وقل طولها L . بدراسة تأثير مختلف هذه العوامل على معدل الانسياب استطاع جان لويس مارى بوازيل (1799–1879) استنتاج معادلة لانسياب السوائل فى مثل هذه المواقف . وعندما لا يكون معدل الانسياب كبيرًا جدًا ، يمكن كتابة هذه المعادلة على الصورة :

$$Q = \left(\frac{\pi R^4}{8\eta L}\right)(P_1 - P_2) \qquad (9\text{–}17)$$

وتعرف هذه المعادلة عادة باسم **قانون بوازيل** . لاحظ أن Q تتناسب مع R^4 .



مثال توضيحى 3–9

يتعرض المسنون كثيرًا لمصاعب متعلقة بالدورة الدموية نتيجة تراكم الرواسب فى الشرايين . بأى معامل يقل معدل انسياب الدم فى شريان إذا نقص نصف قطره إلى النصف ؟

استدلال منطقى : يخبرنا قانون بوازيل أن حجم الدم Q المنساب خلال شريان فى الثانية الواحدة يرتبط بنصف قطره طبقًا للعلاقة :

$$Q \propto R^4$$

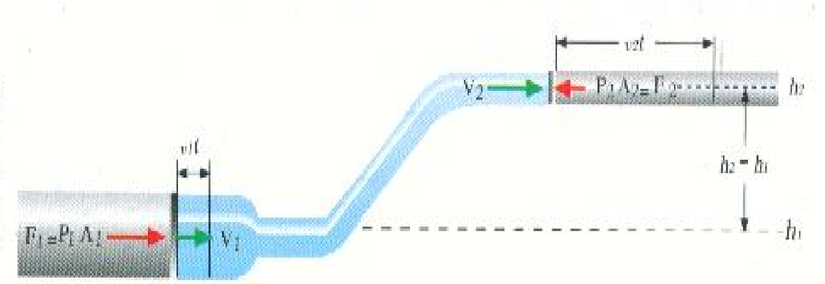
$Q_0 = (\text{constant})\left(R_0^4\right)$ في الشريان الأصلي ، بينما $Q = (\text{constant})(R_0/2)^4$ في حالة الشريان الضيق . من هاتين المعادلتين نجد أن $Q/Q_0 = 1/16$. أي أن معدل الانسياب يقل بمعامل قدره 16 . وواضح من حقيقة أن Q يعتمد بشدة على R لماذا تنشأ مشاكل الدورة الدموية بسبب الرواسب في الشرايين .

تمرين : أوجد معدل انسياب الماء في أنبوبة شعرية طولها 20 cm وقطرها 0.15 cm إذا كان الضغط التفاضلي على طول الأنبوبة 4.0×10^3 Pa . اعتبر أن لزوجة الماء 0.80 mPl .

الإجابة : 3.1 cm³/s .

9-8 معادلة برنولي

رأينا مما سبق أن لكل سائل لزوجة معينة . وإذا كانت اللزوجة كبيرة يكون من الضروري بذل شغل كبير لدفع السائل في الماسورة أو الأنبوبة . ونتيجة لقوى الاحتكاك بين طبقات السائل أثناء الانسياب سوف تفقد بعض الطاقة وتظهر في نهاية الأمر على هيئة حرارة تسبب تسخين السائل . ولكن بعض السوائل تمتاز بأن لزوجتها من الصغر بحيث تكون فواقد الطاقة الاحتكاكية مهملة ، على الأقل لبعض الأغراض وفي هذه الحالة يمكن إيجاد علاقة هامة للضغط في سائل متحرك تسمى **معادلة برنولي** نسبة إلى دانيل برنولي الذي قام بنشرها في عام 1738 .



شكل 21-9 : الشغل المبذول بواسطة F_1 (وهو يساوي P_1A_1) يساوي الشغل المبذول ضد القوة F_2 (والذي يساوي P_2A_2) مضافاً إليه التغيرات في طاقتي الحركة والوضع للسائل .

لندرس حالة انسياب سائل في ماسورة كالمبينة بالشكل 21-9 . هذه الماسورة مملوءة تماماً بسائل غير قابل للانضغاط بين كباسين لا احتكاكيين . لنفرض أن الكباس 1 يدفع إلى اليمين بسرعة ثابتة مقدارها v_1 وأن الكباس 2 يتحرك إلى اليمين بسرعة مقدارها v_2 . في هذه الحالة تتزن القوة F_1 المؤثرة على الكباس 1 مع القوة P_1A_1 الناتجة عن ضغط السائل ، حيث A_1 مساحة الكباس 1 . (لابد أن تتعادل القوتان المؤثرتان على الكباس وإلا سبب صافي القوة المؤثرة عليه تسارعه ، وقد ذكرنا سابقاً أنه يتحرك بسرعة ثابتة) . وبالمثل فإن $F_2 = P_2A_2$ عند الكباس 2 . وحيث أن المسافة التي يتحركها الكباس 1 في زمن قدره t هي v_1t فإن حجم السائل الذي يدفعه هذا الكباس يكون $(v_1t)(A_1)$. وحيث أن السائل غير قابل للانضغاط ، إذن لابد أن يفسح الكباس 2 مكاناً لحجم مساوٍ من السائل . وعليه فإن $(v_1t)(A_1) = (v_2t)(A_2)$ ، أو :

$$v_1A_1 = v_2A_2 \tag{9-18}$$

وقد تساءل برنولى عما يحدث نتيجة للشغل المبذول بواسطة الكباس 1 ، وهو يساوى $F_1(v_1t)$ ، وحيث أن $F_1 = P_1A_1$ ، إذن :

$$\text{دخل الشغل} = P_1A_1v_1t$$

وحيث أن الكباس 2 يبذل كمية من الشغل قدرها $F_2(v_2t)$ فإن جزءًا من دخل الشغل قد استخدم هناك .

بالإضافة إلى ذلك فإن السائل المضغوط إلى اليمين بواسطة الكباس 1 ينتقل بالطبع إلى الأنبوبة العلوية . ونتيجة لذلك يكتسب هذا السائل (وكتلته M وحجمه V) كمية معينة من طاقة الوضع . وأيضًا ، حيث أن السائل يتحرك الآن بسرعة مختلفة v_2 فإن طاقة حركته سوف تتغير أيضًا . وبالطبع سوف تتحول بعض الطاقة إلى طاقة حرارية نتيجة للقوى الاحتكاكية التى تسببها لزوجة السائل ، ولكننا سوف نفرض أن هذه الكمية مهملة .

بهذا الأسلوب يمكن كتابة المعادلة التالية التى تخبرنا بما حدث لدخل الشغل :

التغير فى KE + التغير فى GPE + خرج الشغل = دخل الشغل

أو ، باستخدام رموز الشكل 21–9 :

$$P_1A_1v_1t = P_2A_2v_2t + Mg(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}Mv_2^2 - \frac{1}{2}Mv_1^2$$

حيث M كتلة الحجم المعنى من السائل وقدره A_1v_1t . ومن تعريف الكثافة نجد أن :

$$M = \rho A_1v_1t = \rho A_2v_2t$$

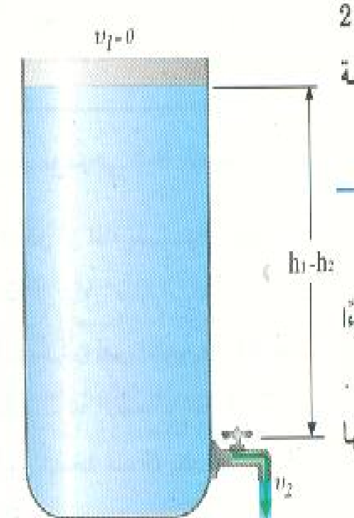
وبالتعويض عن كتلة السائل فى المعادلة السابقة وإعادة ترتيب حدودها نحصل على المعادلة الآتية :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \qquad (9\text{–}19)$$

وهذه هى **معادلة برنولى** . وواضح أن وجود الكباسين غير ضرورى لأن النقطتان 1 و 2 يمكن أن تكونا أى نقطتين فى السائل . لاحظ ، مع ذلك ، أن هذه المعادلة صالحة للتطبيق فقط إذا أمكن إهمال قوة الاحتكاك .

مثال توضيحى 4–9 نظرية توريشيللى

يمثل الشكل 22–9 تطبيقًا بسيطًا لمبدأ برنولى . هذا الشكل يمثل خزانًا كبيرًا مملوءًا بسائل إلى ارتفاع قدره h_1 من القاع يوجد به ذيل ماسورة على ارتفاع h_2 من القاع أيضًا . إذا كان السطح العلوى للسائل معرضًا للجو ، أوجد مقدار السرعة التى ينساب بها السائل من ذيل الماسورة .



شكل 22–9 : تعطينا نظرية توريشيللى سرعة حركة السائل أثناء تدفقه من ذيل الماسورة .

استدلال منطقى : سوف نطبق مبدأ برنولى على النقطة 1 التى تمثل هنا السطح العلوى للسائل والنقطة 2 وهى موضع ذيل الماسورة . وحيث أن ذيل الماسورة صغير جدًا سوف

يكون مقدار سرعة انسياب السائل منه v_2 أكبر كثيرًا من مقدار سرعة انسياب السائل v_1 عند السطح العلوى . ومن ثم يمكن اعتبار أن v_1 تساوى صفرًا بالتقريب . عندئذ يمكن كتابة معادلة برنولى كالتالى :

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

وحيث أن كلاً من P_1 و P_2 يساوى الضغط الجوى تقريبًا ، إذن يمكن اعتبار أنهما متساويان .

وعليه :

$$\rho g h_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

ومنه نحصل على :

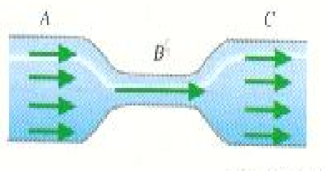
$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \qquad (9\text{–}20)$$

هذه هى **نظرية توريشيللى** . لاحظ أن سرعة التدفق تساوى سرعة جسم يسقط سقوطًا حرًا من ارتفاع قدره $h_1 - h_2$. وهذا يوضح أن تدفق كمية معينة من السائل من ذيل الماسورة يتم كما لو أن نفس الكمية من السائل قد أسقطت سقوطًا حرًا من مستوى سطح السائل إلى مستوى ذيل الماسورة . وبالطبع سوف ينخفض مستوى سطح السائل فى الخزان بعض الشىء ، وتتحول طاقة الجهد التثاقلى المفقودة نتيجة للسقوط إلى طاقة حركة للسائل المتدفق . وإذا وجه ذيل الماسورة إلى أعلى فإن طاقة الحركة سوف تسبب ارتفاع السائل المتدفق إلى نفس مستوى السائل فى الخزان قبل السقوط . ولكن عمليًا تؤدى فواقد طاقة اللزوجة إلى تغير النتيجة بعض الشىء .

تمرين : ما قيمة v_2 إذا كان الخزان مغلقًا عند طرفى الأعلى وكان الضغط فيه kP_0 ، حيث k مقدار ثابت ؟

الإجابة : $\sqrt{2g(h_1 - h_2) + 2(k-1)(P_t)/\rho}$

مثال توضيحى 5–9 الضغط فى ماسورة أفقية



شكل 23–9 : حيث أن سرعة السائل أكبر ما يمكن عند النقطة B فإن الضغط يكون أقل ما يمكن عند هذه النقطة .

افترض أن الماء ينساب فى نظام من المواسير كالمبين بالشكل 23–9 . فى هذه الحالة لابد أن يكون مقدار سرعة الماء فى الماسورة الضيقة عند النقطة B أكبر منه عند النقطتين A و C لأن نفس الكمية من الماء يجب أن تعبر النقط A و B و C فى كل ثانية . بفرض أن مقدار سرعة الانسياب عند A و C تساوى 0.200 m/s ، وتساوى 2.00 m/s عند B ، قارن الضغط عند B بالضغط عند A .

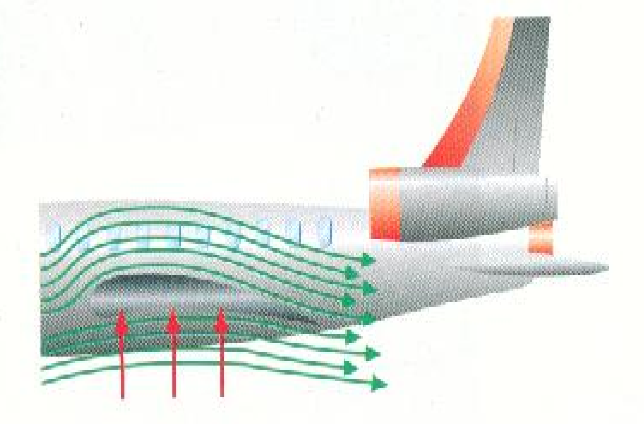
استدلال منطقى : بتطبيق معادلة برنولى وملاحظة أن متوسط طاقة الجهد التثاقلى يساوى مقدارًا ثابتًا عند النقط الثلاث جميعًا نجد أن :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

وبوضع $v_A = 0.200\ \text{m/s}$ ، $v_B = 2.00\ \text{m/s}$ ، $\rho = 1000\ \text{kg/m}^3$ ، نجد أن $P_A - P_B = 1980\ \text{Pa}$. وعليه فإن **ضغط السائل داخل الاختناق أقل كثيرًا منه داخل الماسورتين الكبيرتين الموجودتين على جانبيه** . وربما كان هذا عكس ما قد يمكن أن يتوقعه المرء في البداية ، ولكن هذا صحيح وله تطبيقات واسعة . فعلى سبيل المثال يستخدم الشفاط (جهاز سحب الغاز) في الحصول على تفريغ جزئي بدفع الماء بشدة خلال اختناق حيث يقل الضغط بدرجة كبيرة بسبب الزيادة في سرعة الانسياب .

يمكن إثبات أن الضغط عند A يجب أن يكون أكبر منه عند B بطريقة كيفية كالتالي بما أن كل حجم صغير من السائل يعاني تسارعًا عند انتقاله من A إلى B ، إذن لابد أن يكون هذا السائل واقعًا تحت تأثير قوة غير متزنة متجهة إلى اليمين . ولكي تنشأ هذه القوة يجب أن يقل الضغط في الاتجاه من A إلى B ، ويجب أن تكون قادرًا على أن تعكس هذا الخط في التفكير لإثبات أن الضغط عند C أكبر من الضغط عند B .

هذه النتيجة - وهي أن **الضغط يكون منخفضًا حيث تكون السرعة عالية** ، تعطينا تفسيرًا لعدد من الحقائق المتباينة كرفع الهواء لجناح الطائرة عند الإقلاع والمسار المنحني لكرة يقذفها لاعب كرة قدم ماهر . ويوضح الشكل 24-9 انسياب الهواء حول جناح طائرة . وحيث أن الهواء يجب أن يقطع مسافة أطول فوق السطح العلوي للجناح من المسافة اللازم قطعها تحت الجناح ، إذن لابد أن تكون سرعة الهواء فوق الجناح أكبر منها تحت الجناح . ومن ثم يكون الضغط فوق الجناح أقل منه تحت الجناح ، وبذلك تؤثر القوة المحصلة على الجناح إلى أعلى . وتستخدم نفس هذه الظاهرة أيضًا في تصميم سيارات السابق حيث تستخدم زعانف شبيهة بالأجنحة لتوليد قوة مؤثرة إلى أسفل تؤدي إلى زيادة القوة العمودية ، وبالتالي إلى زيادة قوة الاحتكاك بين إطارات السيارة ومضمار السباق . هذا يمكن السيارة من الحركة في المنحنيات بسرعة أكبر مما يمكنها في الحالات الأخرى . ■

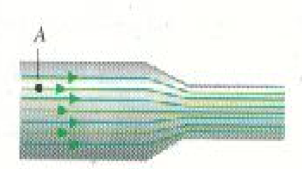


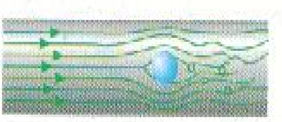
شكل 24-9 : تؤثر على جناح الطائرة قوة متجهة من منطقة السرعة المنخفضة (الضغط العالي) الموجودة تحت الجناح إلى منطقة السرعة العالية (الضغط المنخفض) الموجودة فوق الجناح .

9-9 الانسياب الطبقي مقابل الانسياب المضطرب

لنتفحص الآن كيفية انسياب السوائل في المواسير . عندما يتحرك سائل في ماسورة







شكل 25-9 :
أمثلة للملامح المختلفة للانسياب في ماسورة : (أ) جانبية السرعة ، (ب) الانسياب الطبقي ، (جـ) الانسياب المضطرب .

تحاول قوى الاحتكاك التي تؤثر بها جدران الماسورة على السائل أن تكبح انسياب السائل ، مثلها في ذلك مثل قوى اللزوجة داخل السائل . ونتيجة لذلك سوف ينساب السائل الملاصق للجدران بسرعة أقل من سرعة حركة السائل القريب من منتصف الماسورة . ويوضح الشكل 25-9أ هذه الظاهرة ، حيث تمثل أطوال الأسهم مقدار السرعة في المواضع المختلفة في الأنبوبة . (يلاحظ أن السرعة v في المثالين التوضيحيين 4-9 و 5-9 هي السرعة المتوسطة عبر مقطع الماسورة) .

ويمثل الشكل 25-9ب سمة أخرى لانسياب سائل في ماسورة . لنفرض أن ذرة دقيقة من التراب ، لتلك الذرة الموجودة عند النقطة A ، تنساب مع السائل إذا كان معدل الانسياب منخفضًا سوف تتبع هذه الذرة الخط الموضح أثناء حركتها داخل الماسورة . كذلك فإن الذرات الترابية الأخرى ، والسائل أيضًا ، سوف تتبع خطوطًا ملساء مشابهة . ويطلق على هذه الخطوط اسم **خطوط الانسياب** ، ويسمى هذا النوع من انسياب السوائل **بالانسياب الطبقي** . إذن ، في الانسياب الطبقي يتبع كل عنصر من السائل خط انسياب تكراري معين .

أما إذا كان مقدار سرعة الانسياب كبيرًا سوف يحدث تغير حاد في نسق الانسياب . فبدلاً من أن تكون خطوط الانسياب ملساء ناعمة فإنها ستصبح خطوطًا ملتوية مضطربة كما هو مبين بالشكل 25-9جـ ؛ ويعرف هذا النوع من الانسياب باسم **الانسياب المضطرب** . وفي هذه الحالة تكون فواقد الطاقة الاحتكاكية (أو اللزجة) أكبر مما في حالة الانسياب الطبقي ، وهذا بدوره يسبب زيادة المقاومة الاحتكاكية على الأسطح المتلامسة مع السائل المنساب . وتجدر الإشارة في هذا المقام أن قانون بوازيل لا ينطبق في حالة الانسياب المضطرب .



توضح قطع الشرائط الصغيرة نمط انسياب الريح على سطح سيارة في اختبار نفق الرياح .

ليس من الضرورى أن يكون السائل (أو المائع عمومًا) محصورًا فى ماسورة لكى يحدث هذان النوعان من الانسياب ، إذ يشاهد هذا السلوك عند انسياب المائع على أى سطح مثل جناح الطائرة أو الأسطح الخارجية لهيكل السيارة . ونظرًا لزيادة الاحتكاك المرتبطة ببداية الاضطراب يحاول مصممو السيارات والطائرات تصميم أسطح الطائرات والسيارات بحيث تقل التأثيرات الاضطرابية إلى الحد الأدنى ، ولهذا يكون ابتكار طريقة للتنبؤ ببداية الاضطراب على قدر كبير من الأهمية من الناحية العملية .

عندما يكون انسياب السائل حول الجسم طبقيًا ، تتناسب **القوة المثبطة أو قوة المقاومة** ، F_D تناسبًا خطيًا مع مقدار سرعة الانسياب v . ومع ذلك فإن حساب قوة المقاومة رياضيًا عملية صعبة عمومًا ، ولذلك فإنها تقاس عادة بالطرق العملية . فمثلاً ، تستخدم أنفاق الرياح لقياس قوى المقاومة الناتجة عند انسياب الهواء على أسطح السيارات والطائرات . وفى عام 1843 استطاع الفيزيائى الإنجليزى ج. ستوكس استنتاج علاقة بين F_D و v فى حالة كرة نصف قطرها r تتحرك بسرعة صغيرة فى مائع لزوجته η ، وتعرف هذه العلاقة **بقانون ستوكس** :

$$F_D = 6\pi\eta r v \qquad (9\text{-}21)$$

أما فى حالة السرعات العالية بدرجة كافية لحدوث الانسياب المضطرب فإن قوة المقاومة لا تتناسب ببساطة مع مقدار السرعة ، بل إنها تمثل بمتسلسلة معقدة بدلالة السرعة مرفوعة إلى أسس أعلى . وقد وجد فى معظم الحالات المتعلقة بالسيارات والطائرات أن F_D تتناسب طرديًا مع v^2 :

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \qquad (9\text{-}22)$$

حيث A المساحة الأمامية للسيارة أو الطائرة ؛ ويعرف الثابت اللابعدى C_D **بمعامل مقاومة الهواء** . ويمثل الجدول 5-9 بعض قيم معامل مقاومة الهواء لبعض الأجسام .

وبالرغم من أن معالجة الانسياب المضطرب رياضيًا مسألة فى غاية الصعوبة ، فإن هناك مفهومًا موحدًا يبسط الموقف بدرجة كبيرة . ذلك أن التجربة قد أثبتت أن الانسياب الطبقى يتحول إلى انسياب مضطرب عندما تصل قيمة ثابت لا بعدى يسمى **عدد رينولدز** N_R إلى قيمة حرجة معينة ، ويعطى عدد رينولدز بالعلاقة :

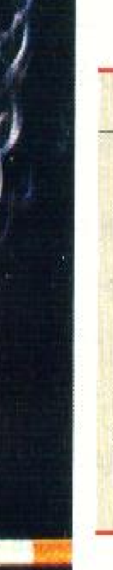
$$N_R = \rho v d / \eta \qquad (9\text{-}23)$$

حيث ρ ، v ، η كثافة المائع ومقدار سرعة انسيابه ولزوجته على الترتيب ؛ d بعد مميز لنظام الانسياب وهو يتوقف على التطبيق المعنى فى كل حالة على حدة . فمثلاً ، عندما يحدث انسياب المائع فى ماسورة يكون d هو نصف قطر الماسورة ؛ وفى حالة حركة كرة فى مائع يكون d هو قطر الكرة ؛ وإذا كان الجسم غير منتظم الشكل كالطائرة مثلا ، يكون d هو متوسط أبعاد الطائرة . ويمثل الجدول 6-9 . بعض الأمثلة لأعداد رينولدز الحرجة .

جدول 5-9 :

القيم النمطية لمعامل مقاومة الهواء المقاسة باستخدام نفق الرياح .

الجسم	معامل مقاومة الهواء
لوح مسطح	1.2
السابح في الهواء (ممتد أفقيًا)	1.0
دراجة نارية وراكبها	0.9
سيارة (سيدان)	0.5
سيارة رياضية (ذات خطوط انسيابية)	0.25
قطار ذو خطوط انسيابية	0.15



مثال للانتقال من الانسياب الطبقي إلى الانسياب المضطرب .

جدول 6-9 :

القيم الحرجة التقريبية لعدد رينولدز .

ظاهرة الانتقال	N_R
- القيمة العظمى لعدد رينولدز N_R للانسياب الطبقي حول كرة (قانون ستوكس) .	10
- بداية الاضطراب في ماسورة أسطوانية ذات مدخل غير منتظم .	1000 - 1200
- بداية الاضطراب في ماسورة أسطوانية طويلة (حد صلاحية قانون بوازيل) .	2000 - 3000
- بداية الاضطراب في المواسير ذات مدخل مزود بمنفث ملائم .	20,000 - 40,000
- الحد العلوى عندما يتبع سلوك الانسياب العلاقة $F_D \propto v^2$	3×10^5

وبالرغم من أن القيم الحرجة لعدد رينولدز تفتقر إلى الدقة فإنها نافعة جدًا في تعيين ما يسمى **قوانين المقياس النسبي** . فمثلاً ، إذا كان لدينا نظامان أحدهما نموذج مطابق للآخر بمقياس رسم معين فإن نمطى انسيابهما سيكونان متطابقين إذا كانت قيمتى N_R لهما متساويتان . ويقال لمثل هذين النظامين أنهما **متشابهان ديناميكيًا** . هذا المفهوم هو الأساس الفيزيائى لاختبارات أنفاق الرياح التى تجرى على نماذج مطابقة مصغرة للسيارات والطائرات . ويكون نمطا الانسياب متشابهين عند تساوى حاصل الضرب vd (ومن ثم N_R) . وعليه فإن الانسياب البطئ (v صغيرة) لمائع حول جسم كبير (d كبيرة) سيطابق انسياب نفس المائع بضعف السرعة حول جسم أصغر مرتين .

مثال 8-9 :

بأى سرعة يمكن أن تسقط قطرة مطر قطرها 3.0 mm قبل أن يصبح انسياب الهواء حولها انسيابًا مضطربًا ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا تمثل قطرة المطر الساقطة ؟

الإجابة : يمكن تقريب قطرة المطر إلى جسم كروى . وعندما تسقط قطرة المطر فى الهواء بسرعة مقدارها v سوف ينساب الهواء عليها بنفس السرعة .

سؤال : ما هو المبدأ الممكن استخدامه لتحديد ما إذا كان الانسياب مضطربًا ؟

الإجابة : قيمة عدد رينولدز . ومن الجدول 6-9 نجد أن القيمة الحرجة لعدد رينولدز فى حالة الكرة هى $N_R = 10$.

سؤال : هل لدينا المعطيات الكافية لإيجاد v_{max} ؟

الإجابة : يمكن إيجاد لزوجة وكثافة الهواء من الجداول :

$$\rho = 1.29\ \text{kg/m}^3 \quad \text{و} \quad \eta = 0.019 \times 10^{-3}\ \text{Pl}$$

كذلك فإن العامل d فى حالة كرة ساقطة هو قطر الكرة ، أى 3.0 mm .

الحل والمناقشة :

بحل المعادلة (9-24) بالنسبة إلى v :

$$v = N_R\, \eta / \rho d$$

يصبح الانسياب مضطربًا إذا زادت قيمة السرعة عن السرعة الحرجة . إذن ، بوضع $N_R = 10$ نجد أن :

$$v_{max} = \frac{(10)(1.9 \times 10^{-5}\ \text{Pl})}{(1.29\ \text{kg/m}^3)(3.0 \times 10^{-3}\ \text{m})}$$

$$= 4.9 \times 10^{-2}\ \text{m/s} = 4.9\ \text{cm/s}$$

لاحظ مدى صغر هذه السرعة . لاحظ أيضًا أن مقدار السرعة يتناسب طرديًا مع قطر قطرة المطر .

مثال 9-9 :

ما هى القيمة التقريبية لحجم الماء الذى يمكن أن ينساب فى الثانية خلال أنبوبة قطرها 2.0 cm قبل حدوث الانسياب المضطرب ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما شرط حدوث الانسياب المضطرب ؟

الإجابة : يحدث الاضطراب عندما يزيد عدد رينولدز عن القيمة الحرجة والتى تتراوح بين 2000 و 3000 كما هو مبين بالجدول 6-9 . ويمكننا اختيار $N_R = 2000$ فى هذا المثال .

سؤال : ما هى العلاقة بين N_R والحجم المنساب فى الثانية ؟

الإجابة : القيمة الحرجة لعدد رينولدز N_R تعطينا القيمة العظمى لمقدار سرعة الانسياب v ، ويكون المعدل الحجمي للانسياب $\Delta V/\Delta t = vA$.

الحل والمناقشة : بوضع في $N_R = 2000$ في المعادلة (9–23) واستعمال لزوجة الماء المعطاة بالجدول 9–4 نحصل على القيمة العظمى لمقدار سرعة الانسياب في حالة الانسياب الطبقي :

$$v_{max} = \frac{(2000)(0.801\times10^{-3}\ \text{Pl})}{(1.00\times10^{3}\ \text{kg}/\text{m}^{3})(2.00\times10^{-2}\ \text{m})} = 0.0801\ \text{m/s} = 8.01\ \text{cm/s}$$

ولكن مساحة مقطع الأنبوبة هي $A = \pi d^2/4 = 3.14\times10^{-4}\ \text{m}^2 = 3.14\ \text{cm}^2$ ، إذن ، القيمة العظمى للمعدل الحجمي للانسياب تكون :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = (8.01\ \text{cm/s})(3.14\ \text{cm}^2) = 25.2\ \text{cm}^2/\text{s}$$

تمرين : ما هما القيمتان العظميان لمقدار سرعة الانسياب والمعدل الحجمي للانسياب في حالة الانسياب الطبقي للماء في ماسورة قطرها 10 cm ؟

الإجابة : $v_{max} = 1.60\ \text{cm/s}$ ، $\Delta V/\Delta t = 126\ \text{cm}^3/\text{s}$.

مثال 9-10 :

ما قيمة القدرة الحصانية اللازمة لتحريك سيارة في الهواء ($\rho = 1.29\ \text{kg/m}^3$) بسرعة ثابتة مقدارها 60.0 mi/h في طريق مستو ؟ افترض أن المساحة الأمامية A للسيارة $2.30\ \text{m}^2$ وأن كتلة السيارة 1250 kg . افترض أيضاً أن عدد رينولدز للسيارة عند هذه السرعة أكبر من القيمة الحرجة .

استدلال منطقي :

سؤال : بماذا يرتبط شرط القدرة في هذا المثال ؟

الإجابة : لتحريك السيارة بسرعة ثابتة يجب أن يولد المحرك قوة كافية عن طريق إطارات عجلات الدفع تساوي قوة مقاومة الهواء المؤثرة على السيارة نتيجة لانسياب الهواء عليها . عليك أن تتذكر أن القدرة الناتجة عن قوة ما هي حاصل ضرب القوة في مقدار سرعة حركة الجسم الذي تؤثر عليه هذه القوة .

سؤال : كيف يمكن حساب قوة مقاومة الهواء ؟

الإجابة : إذا تعدت قيمة عدد رينولدز القيمة الحرجة N_R يكون الانسياب مضطرباً ، وتعطى قوة مقاومة الهواء حينئذ بالمعادلة (9–22) . ويمكننا أن نجد من الجدول 9–5 أن قيمة معامل مقاومة الهواء C_D هي 0.50 ؟

سؤال : ما هي المعادلة الناتجة للقدرة في هذه الحالة ؟

الإجابة : من المعادلة (9–22) نحصل على $F_{app} = F_D = \frac{1}{2}\rho A C_D v^2$. إذن :

$$\text{القدرة} = F_{app}v = \left(\frac{1}{2}\rho A C_D v^2\right)v = \frac{1}{2}\rho A C_D v^3$$

الحل والمناقشة : أولاً تحول 60 mi/h إلى 26.8 m/s . وباستخدام المعطيات نجد أن :

$$\text{القدرة} = \frac{1}{2}(1.29\ \text{kg/m}^3)(2.30\ \text{m}^2)(0.50)(26.8\ \text{m/s})^3 = 1.4 \times 10^4\ \text{W}$$

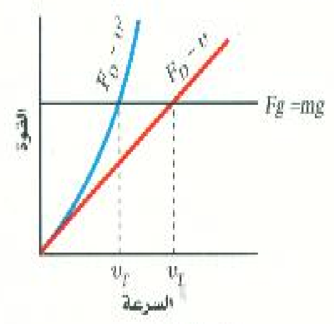
وحيث أن 1 hp = 746 W ، إذن هذه القدرة تساوى 19 hp (1.4 × 104 W)(1 hp/746 W)

لاحظ أن القدرة تعتمد اعتمادًا شديدًا على مقدار سرعة السيارة ($P \propto v^3$) وإذا سارت السيارة بسرعة مقدارها 30 mi/h فلن يلزمها سوى 1/8 هذه القدرة لمعادلة قوة مقاومة الهواء هذا سبب رئيسى فى أن استهلاك الوقود يعتمد بشدة على السرعة .

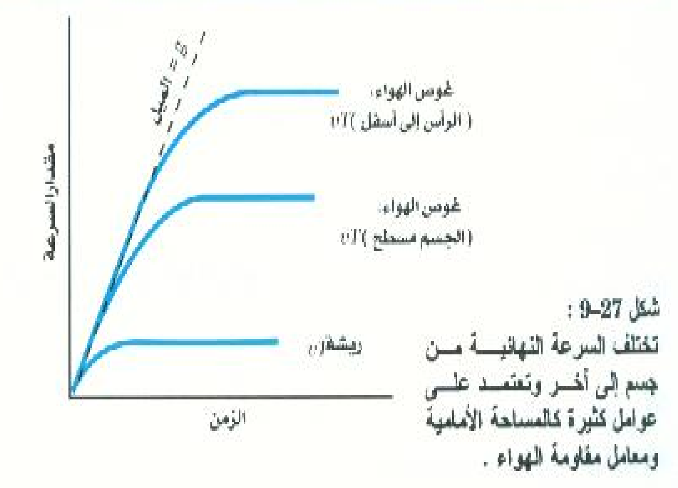
9-10 السرعة النهائية



يتسارع السابحون فى الهواء إلى سرعة نهائية ثابتة تتساوى عندها قوة مقاومة الهواء إلى أعلى مع الوزن إلى أسفل .



شكل 26-9 :
القوى المؤثرة على جسم ساقط . السرعة النهائية هى السرعة التى تتساوى عندها قوة مقاومة الهواء مع وزن الجسم mg .



شكل 27-9 :
تختلف السرعة النهائية من جسم إلى آخر وتعتمد على عوامل كثيرة كالمساحة الأمامية ومعامل مقاومة الهواء .

تعاملنا حتى الآن مع الأجسام الساقطة باعتبارها أجسامًا متسارعة بعجلة ثابتة g . ولكن هناك أمثلة كثيرة تكون فيها الأجسام الساقطة متحركة بسرعة ثابتة وليس بعجلة ثابتة خلال الجزء الأكبر من فترة سقوطها . وفى مثل هذه الحالات تسمى تلك السرعة الثابتة بالسرعة

النهائية . وبالطبع يعنى ثبوت السرعة أن صافى القوة المؤثر على الجسم صفر ، وفى هذه الحالة تكون مقاومة الهواء المؤثرة على الجسم إلى أعلى نتيجة لحركته فى الهواء مساوية لقوة الجاذبية المؤثرة على الجسم إلى أسفل . ويمكن تخيل هذا الموقف بالاستعانة بالشكل 26–9 الذى يمثل القوة مقابل السرعة . لاحظ أن قوة مقاومة الهواء F_D تتناسب غالبًا مع v أو مع v^2 فى بعض الحالات كما رأينا فى القسم السابق ، وهاتان العلاقتان موضحتان فى الشكل . وحيث أن قوة الجاذبية mg لا تعتمد على v فإنها تظهر فى الشكل على هيئة خط أفقى . وبزيادة سرعة الجسم تقترب F_D تدريجيًا من القيمة mg ، وعندما تصل سرعة الجسم إلى v_T يتحقق شرط تلاشى صافة القوة ويصبح $F_D = mg$. ويمكن تمثيل مثل هذه المواقف برسم السرعة مقابل الزمن كما هو مبين بالشكل 27–9 فى حالة السرعات النهائية الصغيرة والمتوسطة والكبيرة . هذه يمكن أن تكون على سبيل المثال حالة ريشة خفيفة وغواص فى الهواء فى حالة السقوط وجسمه مسطح فى اتجاه عمودى على اتجاه السقوط وغواص فى الهواء فى حالة السقوط ورأسه إلى أسفل ويداه مضمومتان إلى جنبيه . ويلاحظ فى كل حالة أن الجسم يبدأ السقوط بنفس العجلة g . هذا وتعتمد السرعة النهائية على كثير من خواص الجسم الساقط ككثافته ومساحته الأمامية وشكله . . إلخ . لندرس الآن سقوط كرة فى الهواء عندما يكون الانسياب طبقيًا .

مثال 11-9 :

تهبط الدقائق المعلقة فى سائل يبطئ بسرعة نهائية تعرف بمعدل الترسيب . أوجد معدل الترسيب لدقائق كروية الشكل نصف قطرها $r = 2.00 \times 10^{-3}$ cm عند سقوطها فى ماء درجة حرارته 20.0°C ، كثافة مادة الدقائق $1050\ kg/m^3$ ولزوجة الماء 1.00 mPl .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى يتعين به معدل الترسيب ؟

الإجابة : معدل الترسيب هو سرعة نهائية ، وعليه فإن الشرط هو أن يكون صافى القوة المؤثرة على الدقائق صفرًا .

سؤال : ما هى القوى المختلفة المؤثرة على الدقائق ؟

الإجابة : تؤثر الجاذبية إلى أسفل ، وتؤثر قوتان إلى أعلى هما قوة الطفو وقوة اللزوجة F_D .

سؤال : ما معادلة كل من هذه القوة ؟

الإجابة : $F_g = mg$ ، $F_B = \rho_f V g$ (مبدأ أرشميدس) ، $F_D = 6\pi\eta r v_T$ (قانون ستوكس) .

سؤال : ما هى المعادلة التى نحصل عليها عندما يكون صافى القوة صفرًا ؟

الإجابة : $mg = \rho_f V_g + 6\pi\eta r v_T$

حيث : $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ و : $m = \rho_p \left(\frac{3}{4}\right)\pi r^3$

الحل والمناقشة : بإجراء التعويضات وترتيب الحدود تتحول معادلة تلاشى صافى القوة إلى :

$$(\rho_p - \rho_f)\frac{4}{3}\pi r^3 g - 6\pi\eta r v_T = 0$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى v_T نحصل على :

$$v_T = \frac{2r^2 g}{9\eta}(\rho_p - \rho_f) = 4.36 \times 10^{-3}\ \text{cm/s}$$

وهذه سرعة منخفضة حقيقية . وبالرغم من ذلك فإن كأسًا يحتوى على هذا المحلول سوف يروق تمامًا بالترسيب خلال بضع ساعات .

ويمكننا أن نرى أن معدل الترسيب يعتمد على الفرق بين كثافتى الدقائق والسائل ، وأيضًا على مساحة مقطع (r^2) الدقائق . لاحظ أيضًا أن v_T تتناسب مع g .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) المائع ، (ب) الجوامد البلورية وغير البلورية ، (جـ) الكثافة ، (د) قانون هوك ، (هـ) الإجهاد والانفعال ، (و) معامل المرونة ، (ز) معامل يونج ، (ح) معامل القص (المرونة القصية) ، (ط) معامل المرونة الحجمية ، (ى) الباسكال ، (ك) مبدأ باسكال ، (ل) قوة الطفو ، (م) مبدأ أرشميدس ، (ن) الانسياب الطبقى والمضطرب ، (س) معادلة برنولى ، (ع) قوة المقاومة ، (ف) السرعة النهائية ، (ص) اللزوجة ، (ق) عدد رينولدز .

2 ـ استخدام تعريف الكثافة فى المواقف البسيطة .

3 ـ استخدام صورة قانون هوك بدلالة الإجهاد والانفعال لحساب تشوه مادة مرنة فى حالة الشد والقص والانضغاط الحجمى بمعلومية معامل المرونة الملائم .

4 ـ إيجاد القوة بمعلومية الضغط والعكس .

5 ـ حساب الضغط المطلق ومدلول ضغط المقياس على عمق معين فى سائل باستخدام المعطيات المناسبة .

6 ـ شرح عمل البارومتر والمانومتر واستخدامهما لحساب ضغط الغاز .

7 ـ التعبير عن الضغط بالباسكال والتور والضغط الجوى والبار .

8 ـ شرح نظرية المكبس الهيدروليكى .

9 ـ استخدام مبدأ أرشميدس لإيجاد قوة الطفو المؤثرة على جسم معلوم الكتلة والكثافة (أو الحجم) .

10 ـ تعريف كل كمية فى معادلة بوازيل واستخدامها فى الحسابات البسيطة .

11 ـ استخدام معادلة برنولى لاشتقاق نظرية توريشيللى وإثبات أن الضغط يكون أقل ما يمكن عندما تكون السرعة أكبر ما يمكن .

12 ـ ربط قوة المقاومة المؤثرة على جسم بسرعته النهائية فى حالة السقوط الحر .

13 ـ استخدام عدد رينولدز والمعلومات المناسبة الأخرى لحساب القيمة التقريبية للسرعة الحرجة عند بداية الانسياب المضطرب فى مائع .

14 ـ حساب قوة المقاومة نتيجة للانسياب اللزج عند سرعات انسياب مختلفة وفى حالات موائع مختلفة بمعلومية عدد رينولدز وأبعاد الجسم ومعامل مقاومة الهواء .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

وحدات الضغط :

$1\ N/m^2 = 1\ Pa$

$1\ atm = 1.01325 \times 10^5\ Pa$

$1\ torr = 1\ mmHg = 133.3\ Pa = (1/760)\ atm$

$1\ bar = 10^5\ Pa$

وحدات اللزوجة :

1 Pa . s = 1 poiseuille (Pl)

1 poise (P) = 0.1 Pl

1 centipoise (cP) = 10^{-3} Pl = 1 mPl

تعريفات ومبادئ أساسية :

الكثافة الكتلية :

$$\rho = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}} = m/V\ (kg/m^3) \quad (9\text{-}1)$$

الوزن النوعى (SG):

$$SG = \frac{\rho}{\rho H_2O} \quad (9\text{-}2)$$

الإجهاد :

أولاً : (9-3)

$$\text{الإجهاد الطولى} = \frac{F}{A}$$

حيث F عمودية على مستوى A .

ثانيًا :

$$\text{الإجهاد القصى} = \frac{F}{A}$$

حيث F عمودية على مستوى A .

ثالثًا :

$$\text{الإجهاد الحجمى} = -\Delta P$$

الانفعال :

أولاً :

$$\text{الانفعال الطولى} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

حيث ΔL يوازى L_0 .

ثانيًا :

$$\text{الانفعال القصى} = \frac{\Delta L}{L_0} = \phi \ (\text{زاوية القص})$$

حيث ΔL عمودى على L_0 .

ثالثًا :

$$\text{الانفعال الحجمى} = \frac{\Delta V}{V}$$

معامل المرونة (N/m^2 أو Pa) :

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

أولاً :

$$\text{معامل يونج} = Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \tag{9-7}$$

ثانيًا :

$$\text{معامل القص}\ S = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \frac{F/A}{\phi} \quad \text{(المرونة القصية)} \tag{9-8}$$

ثالثًا:

$$\text{معامل المرونة الحجمية}\ B = \frac{-\Delta P}{\Delta V/V_0} \tag{9-9}$$

الضغط (P) :

$$P = \frac{F_\perp}{A} \quad (N/m^2 = Pa) \tag{9-10}$$

مدلول ضغط القياس :

$$P_G = P_{tot} - P_a \tag{9-12}$$

مدلول ضغط القياس نتيجة لعمود من مائع

$$P_G = \rho_f g h$$

حيث ρ_f كثافة المائع ، h العمق .

مبدأ أرشميدس :

قوة الطفو F_B تساوي وزن المائع المزاح بواسطة الجسم المغمور جزئيًا أو كليًا فى المائع .

خلاصة :

1 ـ بالنسبة إلى جسم حجمه V مغمور كليًا فى المائع : $F_B = \rho_f V g$

2 ـ شرط طفو جسم كتلته M على سطح سائل هو : $F_B = Mg$

انسياب الموائع :

معادلة اللاانضغاطية : فى حالة السوائل غير القابلة للانضغاط :

$$vA = \text{const.} \quad \text{(فى جميع نقط السائل)} \tag{9-18}$$

حيث v سرعة الانسياب و A مساحة مقطع الانسياب .

اللزوجة (η) :

$$\eta = \frac{\text{الإجهاد القصى}}{\text{معدل القص}} = \frac{F/A}{v/L} \quad (Pa\ .\ s = Pl) \tag{9-16}$$

حيث v السرعة النسبية لطبقتين من المائع تفصلهما مسافة قدرها L .

قانون بوازيل :

معدل الانسياب Q فى سائل لزج :

$$Q = \left(\frac{\pi R^4}{8\eta L}\right)(P_1 - P_2) \quad (\mathrm{m^3/s}) \qquad (9\text{–}17)$$

حيث R نصف قطر الماسورة ، L طول الماسورة ، $P_1 - P_2$ الضغط التفاضلى عبر الطول L .

مبدأ برنولى :

فى حالة الانسياب غير اللزج لسائل ثابت الكثافة :

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{constant} \qquad (9\text{–}19)$$

فى جميع نقط السائل .

خلاصة :

1 ـ من نتائج مبدأ برنولى أن ضغط السائل فى أنبوبة أفقية يكون أصغر ما يمكن عندما تكون سرعة الانسياب أكبر ما يمكن .

عدد رينولدز (N_R) :

$$N_R = \frac{\rho v d}{\eta} \qquad (9\text{–}23)$$

حيث v سرعة الانسياب ، d قطر الأنبوبة أو قطر جسم كروى فى المائع المنساب ، ρ كثافة المائع ، η لزوجة المائع .

خلاصة :

1 ـ القاعدة العامة هى أن انسياب مائع فى ماسورة يكون مضطربًا عندما تتعدى قيمة N_R حوالى 2000 . ويحدث الانتقال إلى الانسياب المضطرب فى حالة كرة متحركة فى مائع عندما يزيد N_R عن 10 تقريبًا .

قوة المقاومة :

عندما يكون الانسياب طبقيًا تعطى المقاومة المؤثرة على كرة نصف قطرها r تتحرك فى مائع بسرعة قدرها v بالمعادلة :

$$F_D = 6\pi\eta r v \qquad (9\text{–}21)$$

وهذا هو قانون ستوكس . وإذا كان الانسياب مضطربًا فإن قوة المقاومة تتناسب مع v^2 :

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \qquad (9\text{–}22)$$

حيث ρ كثافة السائل ، A المساحة الأمامية للجسم ، C_D معامل مقاومة الهواء .

أسئلة وتخمينات

1 ـ كيف يمكنك تعيين كثافة (أ) قالب معدنى مكعب ؟ (ب) سائل ؟ (جـ) قطعة من الحجر ذات شكل غير منتظم ؟

2 ـ كيف يمكنك قياس (أ) معامل شد المطاط فى شريط من المطاط ؟ (ب) معامل قص الجيلاتين ؟ (جـ) معامل المرونة الحجمية للمطاط الرغوى ؟

3 ـ هل يعتمد ضغط الماء عند قاعدة سد على حجم البحيرة الموجودة خلف السد ؟

4 ـ ملأت قارورة جزئيًا بالزئبق ثم أغلقت بإحكام وشحنت فى سفينة فضائية . ما قيمة الضغط على عمق 2.0 cm فى الزئبق عند دوران القارورة حول الأرض وهى فى السفينة الفضائية ؟ وما مقدار الضغط على نفس العمق بعد هبوط السفينة على سطح القمر ؟

5 ـ كيف يمكن تعيين كثافة جسم غير منتظم الشكل إذا كان هذا الجسم (أ) يغوص فى الماء ؟ (ب) يطفو على الماء ؟

6 ـ قدر متوسط كثافة جسم الإنسان . كيف يمكنك قياس كثافة جسمك بدقة قدرها 1 فى المائة باستخدام معدات بسيطة فى حمام سباحة ؟ يطفو بعض الناس على الماء بسهولة أكثر من غيرهم . اشرح العوامل المتعلقة بذلك ؟

7 ـ كيف تطفو السفينة المصنوعة من الصلب على الماء ؟ ألا يغوص الصلب دائمًا فى الماء ؟ كيف تنتقل الغواصة إلى الأعماق المختلفة ؟

8 ـ كوب مملوء إلى حافته بالماء وبه مكعب من الثلج يطفو جزئيًا فوق الماء . هل يطفح الماء من الكوب عندما ينصهر مكعب الثلج ؟

9 ـ وضعت كأس زجاجية مملوءة إلى حافتها بالماء على ميزان ثم وضع قالب خشبى فى الماء فطفا على سطحه ، وعندئذ طفح بعض الماء خارج الكأس ونشف بقطعة من القماش وفى النهاية ظلت الكأس مملوءة إلى حافتها . قارن قراءتى الميزان الابتدائية والنهائية .

10 ـ يحتوى الدم على كثير من العوالق الدقيقة التى لا يمكن رؤيتها بالميكروسكوب ، وتستخدم قياسات معدل الترسيب لمعرفة ما إذا كانت هذه الدقائق متكتلة فى مجموعات أم لا . اشرح كيف يمكن تحقيق ذلك وناقش الفروض التى تضعها .

11 ـ لماذا لا يستخدم الناس البارومترات المائية مع أن الزئبق مادة سامة وغالية الثمن ؟

12 ـ من الممكن أن نتخيل أن جزيئات الغاز المثالى تعمل ككرات دقيقة فى حالة حركة مستمرة ، وكذلك يمكن وجود غاز مثالى مكون من جسيمات ذات حجم غروى . ولكن الكريات الزجاجية والكرات العادية لا تسلك سلوك الغاز المثالى . أين يقع الخط الحجمى الفاصل بين النوعين وبماذا يتحدد ؟

13 ـ يتغير تركيب الهواء مع الارتفاع ، فكلما زاد الارتفاع زادت النسبة المئوية لجزيئات الهيدروجين وقلت النسبة المئوية لجزيئات النيتروجين . لماذا ؟

مسائل

افترض أن الضغط الجوى 101 kPa مالم ينص على غير ذلك .

القسمان 1–9 و 2–9

1 ـ كرة مصمتة مصنوعة من مادة معينة نصف قطرها 3.0 cm وكتلتها 98.0 g ما هى كثافة مادة الكرة ؟

2 ـ مكعب مصمت طول ضلعه 2.0 cm وكتلته 24 g . ما هى كثافة المكعب ؟

3 ـ ما هى القيمة التقريبية لكتلة الهواء الموجود فى غرفة على هيئة صندوق حجمه $6.0 \times 5.0 \times 2.5\ m^3$ عند 20°C ؟

4 ـ قارورة كتلتها فارغة تساوى 220 g ، وكتلتها وهى مملوءة بالماء 340 g ، وكتلتها وهى مملوءة ببلازما الدم 344 g . ما هى كثافة البلازما ؟

5 ـ ما كتلة مكعب من الثلج طول ضلعه 4.0 cm ؟

6 ـ أمر ملك بصناعة تاج له من الذهب الخالص كتلته 2.00 kg ، وعندما وصل التاج شك الملك فى نقائه فأمر بقياس حجمه فوجد أنه $190\ cm^2$. هل التاج مصنوع من الذهب الخالص ؟

■ 7 ـ إذا كان التاج فى المسألة 6 مصنوعًا من خليط من النحاس الأصفر والذهب ، فما هى النسبة المئوية للذهب الخالص فى التاج ؟

■ 8 ـ كثافة النجم النيوترونى $1 \times 10^{19}\ kg/m^3$. ما قيمة نصف قطر الأرض إذا كانت كثافتها تساوى كثافة النجم النيوترونى ؟ كتلة الأرض $M_e = 5.98 \times 10^{24}\ kg$.

9 ـ لتعيين كثافة سائل مجهول تملأ قارورة حجمها $100\ cm^3$ وكتلتها 56.5 g بهذا السائل ثم توزن بالسائل . فإذا كانت كتلة السائل الذى يملأ القارورة 231.3 g ، ما كثافة هذا السائل ؟

■ 10 ـ استخدمت طالبة مخبارًا مدرجًا حجمه $50.0\ cm^3$ وكتلته $36.7\ g$ لتعيين القيمة التقريبية لكثافة حجر كتلته $52.2\ g$. وضعت الطالبة الحجر فى المخبار ثم صبت فيه الماء حتى وصل سطح الماء إلى العلامة $50.0\ cm^3$. فإذا كانت الكتلة الكلية للنظام $130.0\ g$ ، فما هى كثافة الحجر ؟

11 ـ إذا كان سعر الفضة $150,00/kg$ ، ما طول ضلع مكعب من الفضة ثمنه 1 مليون دولار (كثافة الفضة $10.5 \times 10^3\ kg/m^3$) ؟

12 ـ طبقة جيولوجية مائية على هيئة صندوق مستطيل أبعادها $2.0\ m \times 1.8\ m \times 30\ cm$. أوجد وزن الماء داخل الطبقة . (إهمل أبعاد الغطاء الخارجى) .

القسم 9-3

13 ـ علق حمل كتلته $7.2\ kg$ فى سلك طوله $3.2\ m$ ونصف قطره $0.36\ mm$ فاستطال السلك بمقدار $1.58\ mm$. ما هو معامل يونج لمادة السلك ؟

14 ـ سبب حمل قدره $24\ kg$ استطالة سلك من الصلب طوله $160\ cm$ ونصف قطره $0.56\ mm$. ما مقدار استطالة السلك تحت تأثير هذا الحمل ؟

15 ـ عمود أسطوانى من الألمنيوم ارتفاعه $6.0\ m$ ونصف قطره $30\ cm$. إذا وضع على قمة هذا العمود تمثال كتلته $2200\ kg$ ، ما مقدار انضغاط العمود ؟

16 ـ يستخدم عمود من الصلب طوله $6.0\ m$ ونصف قطره $2.0\ cm$ فى حمل جزء من كوبرى ، وقد صمم العمود بحيث لا يستطيل بأكثر من $6 \times 10^{-5}\ m$. ما أكبر حمل يستطيع العمود أن يتحمله ؟

17 ـ ما مقدار القوة اللازمة لضغط مكعب من النحاس الأصفر طوله ضلعه $3.0\ cm$ إلى 99.8 فى المائة من ارتفاعه الأصلى ؟ (افترض أن المكعب ينضغط فى اتجاه واحد فقط) .

18 ـ ما مقدار القوة اللازمة لضغط المكعب السابق وصفه فى المسألة 17 إلى 99.8 فى المائة فى الأبعاد الثلاثة كلها ؟

19 ـ وضع مكعب من الجيلاتين طول ضلعه $4.0\ cm$ تحت تأثير قوة قاصة قدرها $0.50\ N$ على سطحه العلوى فأزيح هذا السطح بمقدار $2.7\ mm$. ما قيمة معامل القص للجيلاتين ؟

20 ـ ما مقدار الزيادة فى الضغط اللازمة لإنقاص حجم عينة من الماء بمقدار 2 فى المائة ؟

21 ـ انكمش قالب من المطاط الرغوى بمقدار 12 فى المائة عندما تعرض لضغط قدره $1000\ kPa$. ما هو معامل المرونة الحجمية للمطاط ؟

■ 22 ـ ينكسر الصلب إذا زاد الإجهاد القصى عن حوالى $4.0 \times 10^5\ kPa$. عين القيمة الصغرى لقوة القص اللازمة لخرم ثقب نصف قطره $1\ cm$ فى لوح من الصلب سمكه $1.0\ cm$.

القسمان 9-4 و 9-5

23 ـ الضغط الجوى يساوى $100\ kPa$ تقريبًا . ما قيمة التغير النسبى فى حجم كرة زجاجية عند تفريغ الهواء من حولها داخل غرفة تفريغ ؟

24 ـ بأى مقدار يجب زيادة الضغط عن الضغط الجوى لكى يقل حجم الزئبق بمقدار 0.1 فى المائة ؟

25 ـ لنفرض أن هناك فراغًا مثاليًا داخل علبة قهوة معلقة بإحكام . ما مقدار القوة المؤثرة على غطاء العلبة ، وقطره $8.0\ cm$ ، عند تعرض العلبة للجو ؟ اعتبر أن $P_a = 100\ kPa$.

26 ـ بأى قوة يؤثر الجو على ظهر رجل ؟ افترض أن $P_a = 100\ kPa$ وأن مساحة ظهر الرجل حوالى $320\ cm^2$. لماذا لا تسحق هذه القوة الهائلة ذلك الشخص ؟

27 ـ ما قيمة ضغط الماء فى قاع بحيرة عمقها $12\ m$ ؟ قارن هذه القيمة بالضغط الجوى وقدره $100\ kPa$ تقريبًا .

28 ـ ما قيمة الضغط المطلق عند قاع البحيرة المذكورة في المسألة 27 ؟

29 ـ ما مقدار ضغط الزئبق عند قاعدة عمود من الزئبق ارتفاعه 765 mm . قارن هذا الضغط بالضغط الجوى وقدره 100 kPa تقريبًا ؟

■ 30 ـ يزيد الضغط في ماسورة مياه بالطابق الأرضي لمبنى عالٍ عن الضغط الجوى بمقدار 2.8×10^5 Pa. وإذا كان الضغط في نفس الماسورة بالطابق العلوى يساوى 1.2×10^5 Pa فقط ، فما ارتفاع المبنى ؟

■ 31 ـ (أ) ما ضغط الماء على عمق 1600 m تحت سطح المحيط ؟ اعتبر أن كثافة ماء البحر 1025 kg/m^3 . (ب) إذا كان معامل المرونة الحجمية لماء البحر والماء النقي متساويين ، بأى نسبة مئوية تزيد كثافة الماء على هذا العمق عن كثافته عند السطح ؟

■ 32 ـ سيارة كتلتها 1250 kg تحملها أربع عجلات مدلول ضغط القياس في إطاراتها 180 kPa . ما مساحة سطح تلامس كل إطار مع رصف الطريق ؟ افترض أن نصيب العجلات من الحمل متساوى .

■ 33 ـ مدلول ضغط القياس عند قاع خزان خمسة أمثال قيمته على عمق 1.2 m . ما عمق الخزان ؟

■ 34 ـ وعاء يحتوى على طبقة من الزيت سمكها 12 cm تطفو على 25 cm من الماء . إذا كانت كثافة الزيت 850 kg/m^3 ، ما هو الضغط الكلى نتيجة للسائلين عند قاع الوعاء ؟

35 ـ أنبوبة زجاجية على شكل الحرف U كالمبينة بالشكل 9-15 . صب الماء في الأنبوبة حتى وصل إلى ارتفاع قدره 12 cm في الفرعين . بعدئذ أضيف الكيروسين ($\rho = 870$ kg/m^3) ببطئ في أحد الفرعين إلى أن ارتفع الماء في الفرع الآخر بمقدار 5 cm . ما طول عمود الكيروسين ؟

36 ـ افترض في المسألة السابقة أننا صببنا طولاً قدره 3.0 cm من البنزين في أحد الفرعين . بأى قدر سوف يرتفع عمود الماء ؟

37 ـ إذا كان طول عمود الزئبق في بارومتر 74.6 cm ، ما قيمة الضغط الجوى ؟

38 ـ تؤثر آلات التشكيل بالكبس الهيدروليكية بقوى هائلة على الألواح المعدنية لتشكيلها في الصورة المطلوب . لنفرض أن دخل القوة المؤثر على كباس قطره 1.80 cm يساوى 900 N ، وأن خرج القوة يؤثر على كباس قطره 36 cm . ما مقدار القوة التى يؤثر بها الكباس على اللوح الجارى تشكيله ؟

■ 39 ـ إذا كانت مساحة مقطع كباس إبرة للحقن تحت الجلد 0.76 cm^2 ، ما مقدار القوة التى يجب تسليطها على الكباس إذا أريد حقن سائل في وريد يزيد الضغط فيه عن الضغط الجوى بمقدار 18.6 kPa .

40 ـ حبست كمية من الماء داخل إناء قوى باستخدام كباس مساحة مقطعه 0.60 cm^2 . ما مقدار القوة اللازم تسليطها على الكباس بحيث تزيد كثافة الماء بمقدار 0.01 في المائة ؟

41 ـ افترض أن بارومترًا مائيًا قد استخدم لقياس الضغط الجوى . ما طول عمود الماء في يوم يقرأ في بارومتر زئبقى 76 cm ؟

■ 42 ـ الضغط الجوى في دنفر ، وهي مدينة ترتفع ميلاً عن سطح البحر ، يساوى 60 cmHg فقط . ما طول عمود الزيت (وكثافته 879 kg/m^3) الذى يستطيع هذا الضغط أن يحمله ؟

43 ـ بأى قوة يضغط الجو إلى أسفل على كتاب أبعاده 28 cm × 20 cm موضوع على منضدة عندما يكون الضغط الجوى 100 kPa ؟ وإذا كانت كتلة الكتاب 2.1 kg ، ما نسبة هذه القوة إلى وزن الكتاب ؟

■ 44 ـ بأى قوة يؤثر الجو على سطح كرة قطرها 24 cm ؟ افترض أن الضغط الجوى 98 kPa .

القسم 9-6

45 ـ مكعب من المعدن طول ضلعه 2.0 cm . ما مقدار قوة الطفو المؤثرة عليه عندما يكون مغمورًا كليًا في زيت كثافته 864 kg/m^3 ؟

46 ـ جسم كتلته 2.40 g ، وكتلته الظاهرية 1.62 g عندما يكون مغمورًا كليًا فى الماء عند 20°C . (أ) ما حجم الجسم ؟ (ب) ما كثافته ؟

47 ـ جسم كتلته 6.24 g ، وكتلته الظاهرية 5.39 g عندما يكون مغمورًا كليًا فى الزيت . أوجد كثافة الزيت إذا كانت كثافة الجسم $6.4\ g/cm^3$.

48 ـ جسم كتلته 4.923 g ، وكتلته الظاهرية 2.241 g عندما يكون مغمورًا كليًا فى الماء . فإذا كانت الكتلة الظاهرية للجسم عندما يكون مغمورًا كليًا فى زيت معين ، فما هى كثافة هذا الزيت ؟

49 ـ لكى تظل امرأة وزنها 480 N مغمورة كليًا فى الماء يجب أن تؤثر عليها قوة رأسية إلى أسفل مقدارها 18 N . ما كثافة جسم هذه المرأة ؟

50 ـ قالب من البلاستيك الرغوى حجمه $25\ cm^3$ وكثافته $800\ kg/m^3$. ما مقدار القوة اللازمة لغمره تحت الماء ؟

51 ـ يطفو قالب من مادة مجهولة على سطح الماء بحيث كان 25 فى المائة من حجمه ظاهرًا على السطح . ما كثافة مادة القالب ؟

52 ـ تتكون الجبال الجليدية من ماء نقى كثافته $920\ kg/m^3$ ، وكثافة ماء المحيط الذى تطفو عليه هذه الجبال تساوى $1.03 \times 10^3\ kg/m^3$ تقريبًا . ما هى النسبة التى تختفى تحت سطح الماء من الجبل الجليدى ؟

■ 53 ـ رمث* مساحته 6 m × 4 m يطفو على سطح نهر . وعندما وضعت عليه سيارة غطس منه سمك قدره 3.0 cm فى الماء . ما وزن السيارة ؟

■ 54 ـ ما هو أصغر حجم لقالب من مادة (كثافتها $810\ kg/m^3$) يستطيع أن يحفظ رجلاً كتلته 64 kg فوق سطح الماء تمامًا فى بحيرة عندما يقف هذا الرجل على القالب ؟

■ 55 ـ عندما وضع كأس مملوء جزئيًا بالماء على ميزان دقيق قرأ الميزان 22 g . فإذا وضعت قطعة من الخشب كثافتها $905\ kg/m^3$ وحجمها $2.1\ cm^3$ طافية على الماء فى الكأس ، فماذا يقرأ الميزان ؟

■ 56 ـ عندما وضع كأس مملوء جزئيًا بالماء على ميزان دقيق قرأ الميزان 22 g . فإذا علقت قطعة من المعدن كثافتها $3800\ kg/m^3$ وحجمها $2.4\ cm^3$ باستخدام خيط دقيق بحيث كانت مغمورة تمامًا فى الماء دون أن تمس قاع الكأس ، ماذا ستكون قراءة الميزان ؟

■ 57 ـ يراد وزن قالب من البلاستيك الرغوى كثافته $600\ kg/m^3$ وحجمه $240\ cm^3$ مع قطعة من الألمنيوم بحيث يغطس القالب بالكاد فى الماء . ما كتلة قطعة الألمنيوم اللازم تعليقها فى القالب ؟

■ 58 ـ مكعب من المعدن (كثافته $6 \times 10^3\ kg/m^3$) به فجوة بداخله . فإذا كان وزن المكعب فى الهواء 2.4 ضعفا قدر وزنه وهو مغمور كليًا فى الماء ، فما هى النسبة الحجمية للفجوة الموجودة داخل المكعب ؟

القسم 9-7

59 ـ بأى معامل يتغير معدل انسياب سائل فى أنبوبة شعرية إذا تضاعف طولها خمس مرات وتضاعف نصف قطرها ثلاث مرات ؟ افترض أن فرق الضغط عبر طرفى الأنبوبة لا يتغير .

60 ـ استبدلت إبرة محقن تحت جلدى طولها ثلثا الطول الأصلى وقطرها ثلث القطر الأصلى . بأى معامل يجب أن يتغير فرق الضغط عبر الإبرة إذا كان معدل الانسياب ثابتًا ؟

■ 61 ـ إبرة محقن تحت جلدى طولها 3.6 cm وقطرها الداخلى 0.24 mm ومساحة مقطع كباسها $0.084\ cm^2$. إذا كانت القوة المؤثرة على الكباس 6.4 N ، ما هو معدل انسياب الماء خلال الإبرة عند 30°C ؟

---

* الرمث (أو الطوف) خشب يشد بعضه إلى بعض ويركب فى البحر أو النهر .

■ 62 ـ تستخدم إبرة طولها 4.0 cm ونصف قطرها الداخلي 0.3 mm لنقل الدم . ولخلق فرق الضغط عبر الإبرة ترفع قنينة الدم بمقدار 1 m فوق ذراع المريض . فإذا كان ضغط الدم في وريد المريض 10 mmHg ، (أ) ما معدل انسياب الدم خلال الإبرة ؟ (ب) ما الزمن اللازم لحقن 1 liter من الدم في الوريد ، إذا كان معدل الانسياب ثابتًا بهذه القيمة ؟ كثافة الدم $1050\ kg/m^3$ ومعامل لزوجته 4×10^{-3} Pa .

■ 63 ـ ضغط دم أحد الأشخاص 125/85 mmHg ومتوسط ضغط الدم حوالي 105 mmHg ، وهو ما يعادل 1.40×10^4 Pa تقريبًا . افترض أن إبرة حقن طولها 4.0 cm ونصف قطرها 0.3 mm قد أدخلت في وريد ضغط الدم فيه يساوي هذه القيمة المتوسطة . بأي معدل سوف يتدفق الدم من الإبرة ؟ استخدم $\eta_{blood} = 4$ mPl .

■ 64 ـ قالب مكعب الشكل طول ضلعه 3.0 cm يستقر على لوح مستو وبينهما طبقة من الزيت سمكها 0.04 mm ($\eta_{oil} = 0.40$ mPl) ما هي القوة اللازمة لشد القالب على اللوح بسرعة مقدارها 0.3 m/s ؟

■ 65 ـ يتناقص ضغط الماء في ماسورة أفقية عند 20°C بمعدل قدره 60 kPa لكل 100 m عندما ينساب الماء فيها بمعدل 3.0 liter/min . ما مقدار نصف قطر الماسورة ؟

القسمان 8-9 و 9-9

66 ـ يتسرب الماء من ماسورة قريبة من قاع خزان ضخم لتخزين الماء على هيئة تيار من الماء مندفع منها . فإذا كان سطح الماء في الخزان يقع على ارتفاع 10 m من نقطة التسرب ، (أ) بأي سرعة يندفع الماء من الفتحة ؟ (ب) إذا كانت مساحة الفتحة $0.08\ cm^2$ ، فما هي كمية الماء المتدفقة منها في 1 min ؟

67 ـ ينساب الماء داخل نظام مغلق من المواسير ، وكانت سرعة الماء عند إحدى النقط 2.8 m/s بينما كانت سرعته 4.2 m/s عند نقطة أخرى ترتفع عن الأولى بمقدار 4.0 m . (أ) ما مقدار الضغط عند النقطة العليا إذا كان مقداره 84 kPa عند النقطة السفلى ؟ (ب) ما هو الضغط عند النقطة العليا إذا كان الماء يتوقف عن الانسياب عندما يكون الضغط عند النقطة السفلى 62 kPa ؟ افترض أن هذه الضغوط جميعها هي الضغوط المطلقة .

68 ـ صمم جناح طائرة بحيث تكون سرعة الهواء تحت الجناح 300 m/s عندما تكون سرعته عبر السطح العلوي 360 m/s . ما هو فرق الضغط بين السطحين العلوي والسفلي للجناح ؟

69 ـ إذا كانت مساحة الجناح في المسألة 68 تساوي $20\ m^2$ ، ما قيمة صافي القوة المؤثرة على الجناح ؟

70 ـ أنبوبة أفقية قطرها 4.0 cm تتصل بأنبوبة أخرى قطرها 3.0 cm ، وكان فرق الضغط بين الأنبوبتين 7.2 kPa . (أ) في أي الأنبوبتين يكون الضغط أكبر مما في الأخرى ؟ (ب) ما حجم الماء المتدفق في الأنبوبتين في الدقيقة ؟

71 ـ يندفع الماء من فوهة رشاش الحديقة رأسيًا إلى أعلى ويصل إلى ارتفاع قدره 5 m . ما مدلول ضغط المقياس في الفوهة ؟

■ 72 ـ يتدفق الدم (وكثافته $1050\ kg/m^3$) بسرعة مقدارها 30 cm/s في الأورطي . فإذا كانت مساحة مقطع الأورطي $1.6\ cm^2$ ، فما معدل تدفق الدم فيه بالكيلوجرامات في الثانية ؟ وبعد أن يتفرع الأورطي فإنه يتحول إلى عدد كبير من الشعيرات الدقيقة مساحة مقطعها الإجمالية $2.0 \times 10^3\ cm^2$. ما سرعة تدفق الدم في هذه الشعيرات ؟

■ 73 ـ سيارة ارتفاعها 1.8 m وارتفاع نموذجها المصغر 18.0 cm . إذا اختبر هذا النموذج في نفق الرياح . فبأي سرعة يجب أن يتحرك الهواء على النموذج لمحاكاة حركة السيارة الفعلية بسرعة مقدارها 80 km/h ؟

■ 74 ـ إثبت أن عدد رينولدز يمكن كتابته على الصورة $N_R = 2Q\rho/\pi\eta r$ في حالة انسياب سائل في ماسورة أسطوانية نصف قطرها r .

75 ـ بأي سرعة يمكن أن تسقط قطرة من الماء قطرها 3.6 mm في الوعاء قبل أن يبدأ الانسياب المضطرب ؟ اعتبر أن $N_R = 10$.

76 ـ عين سرعة تدفق الماء خلال أنبوبة قطرها 1.0 cm عندما يصبح الانسياب مضطربًا . اعتبر أن $N_R = 3000$.

القسم 10-9

77 ـ ما مقدار السرعة النهائية لقطرة من الماء قطرها 4.0 mm تسقط في الهواء بفرض أن قانون ستوكس ينطبق على هذه الحالة ؟ هل ينطبق قانون ستوكس فعلاً على هذا الموقف ؟

78 ـ السرعة النهائية لكرات مصمتة صغيرة قطرها 1 mm أثناء سقوطها في الماء تساوي 1.2 cm/s . ما كثافة الكرات ؟

79 ـ سقطت قطرة من الزيت (كثافته $850\ kg/m^3$) في الهواء فوجد أن سرعتها النهائية 0.05 mm/s . عين نصف قطر القطرة إذا علمت أن كثافة الهواء $1.29\ kg/m^3$ ولزوجة الهواء $\eta_{air} = 0.019$ mPl .

80 ـ تسقط كرة من الألمنيوم نصف قطرها 0.4 mm في ماء درجة حرارته 30°C . أوجد (أ) قوة الطفو المؤثرة على الكرة ، (ب) السرعة النهائية للكرة . افترض أن الانسياب طبقي .

81 ـ أوجد النسبة بين معدلات ترسيب خليط من الكرات الصغيرة المصنوعة جميعها من نفس المادة والنسبة بين أقطارها 3 : 2 : 1 .

▪ 82 ـ شكلت قطعة من الخشب (كثافته $\rho = 840\ kg/m^3$) في صورة كرة نصف قطرها 0.6 cm . حررت هذه الكرة من موضع عميق في بحيرة فبدأت في الارتفاع إلى السطح . بفرض أن الانسياب طبقي ، ما قيمة السرعة النهائية للكرة أثناء حركتها ؟ هل الفرض بأن الانسياب طبقي فرض مبرر ؟

مسائل إضافية

▪▪ 83 ـ لصقت شريحة من المطاط سمكها 3.2 mm بين لوحين معدنيين متوازيين مساحة كل منهما تساوي مساحة سطح الشريحة وقدره 10.0 cm × 10.0 cm . طبق إجهاد قصي على المطاط بشد اللوحين في اتجاهين متضادين بقوة قدرها 45 N . ما مقدار إزاحة أحد اللوحين بالنسبة إلى الآخر إذا كان معامل قص المطاط 1.20 MPa ؟

▪▪ 84 ـ جذب قالب كتلته 10 kg على سطح أفقي باستخدام سلك من الصلب نصف قطره $2.0\ mm^2$. إذا كان الاحتكاك مهملاً ، فما هي أكبر عجلة يمكن أن يكتسبها القالب ؟ مقاومة شد الصلب 0.50 GPa .

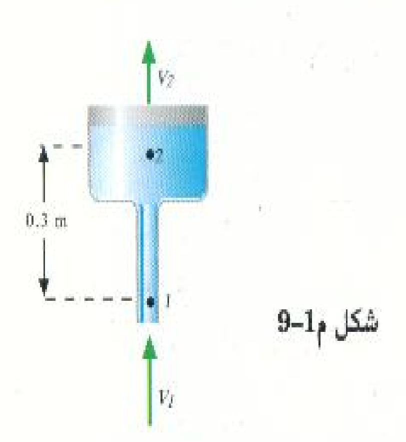
▪▪ 85 ـ سقطت سيارة مغلقة النوافذ من فوق كوبري فوقعت في النهر ، وعندما وصلت السيارة إلى السكون كان مركز باب السائق على عمق قدره 3.6 m تحت سطح الماء . ما هي القوة التي يجب أن يؤثر بها السائق على الباب حتى يتمكن من فتحه ؟ مساحة الباب حوالي $0.9\ m^2$.

▪▪ 86 ـ في مرفاع السيارات الهيدروليكي يستخدم الهواء المضغوط في تسليط قوة معينة على كباس صغير نصف قطره 4 cm ، ويستخدم هذا الضغط في رفع سيارة وزنها 12,000 N على كباس آخر نصف قطره 20 cm . ما قيمة ضغط الهواء على الكباس الصغير اللازم لرفع السيارة ؟

▪▪ 87 ـ يستخدم مانومتر زئبقي لمراقبة الضغط في غرفة التفاعلات الكيميائية ، وكان مستوى سطح الزئبق في الفرع المفتوح على الهواء أعلى من مستواه في الفراع المتصل بالغرفة بمقدار 2.83 cm عندما كانت قراءة البارومتر 74.82 cmHg . ما قيمة الضغط داخل غرفة التفاعلات ؟

▪▪ 88 ـ استخدم مانومتر زيتي (كثافة الزيت $864\ kg/m^3$) لقياس الضغط داخل غرفة للاختبارات البيئية ، وكان مستوى سطح الزيت في الفرع المفتوح على الهواء أعلى من مستواه في الفرع المتصل بالغرفة بمقدار 11.6 cm . فإذا كانت قراءة البارومتر 74.23 cmHg ، ما قيمة الضغط داخل الغرفة ؟

■■ 89 ـ (أ) ينساب الماء داخل نظام المواسير الموضح بالشكل م1-9 إلى أعلى ، وكان نصفا قطرى الماسورة r_1 ، r_2 عند النقطتين 1 و 2 على الترتيب . فإذا كان مقدار سرعة الماء 30 cm/s عند النقطة 1 ، ما قيمة فرق الضغط $P_2 - P_1$ بين هاتين النقطتين ؟ (ب) كرر المسألة إذا كان الانسياب في الاتجاه المعاكس .



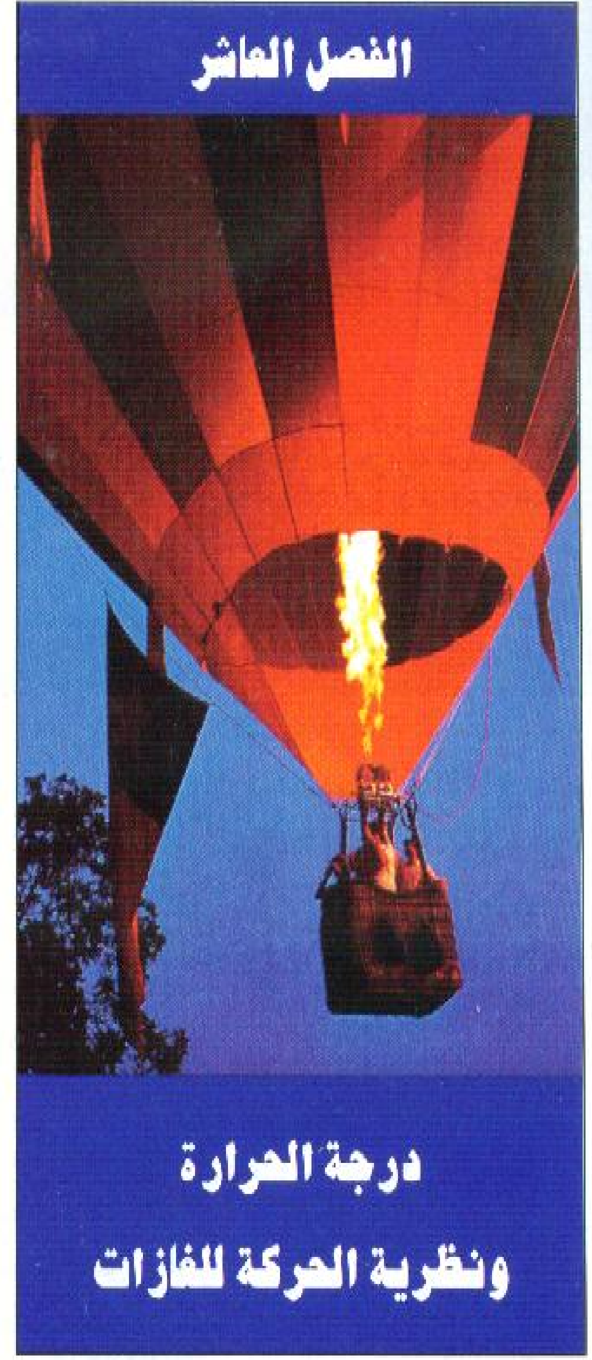
شكل م1-9

■■ 90 ـ استخدم سلك رفيع دقيق فى رفع كرة من الألمنيوم نصف قطرها b بسرعة ثابتة v خلال سائل كثافته ρ ولزوجته η . أوجد الشد فى السلك .

■■ 91 ـ ينطلق الماء من فوهة خرطوم مطافئ بمعدل قدره 0.02 m³/s ، وعندما وجهت الفوهة إلى أعلى وصل الماء إلى ارتفاع قدره 32 m . لنفرض أن الخرطوم كان فى وضع أفقى فوق الأرض عندما حاول رجل المطافئ توجيه فوهته رأسيًا إلى أعلى . صف القوة الأفقية التى يجب أن يؤثر بها رجل المطافئ على الفوهة لكى يحتفظ بها ساكنة .

■■ 92 ـ عند استخدام مانومتر كحولى على شكل حرف U لقياس ضغط غاز معين فى وعاء مغلق وجد أن الفرق بين ارتفاعى الكحول هو $h_1 - h_2 = 80$ cm عندما كان الطرف 1 مفتوحًا على الغرفة والطرف 2 متصلاً بالغاز ، كما وجد أن بارومترًا زئبقيًا فى نفس الغرفة يعطى قراءة قدرها 740 mm . ما قيمة كل من مدلول ضغط القياس والضغط المطلق للغاز بالتور والوحدات SI ؟

■ 93 ـ عندما يملأ كيس بالون بغاز الهليوم فإنه يصبح على شكل كرة قطرها 40 m ، ما هو الوزن الكلى ، بما فيه الكيس والجندول والمحتويات ، الذى يستطيع البالون رفعه فى الهواء عند معدل الضغط ودرجة الحرارة ؟ وإذا أريد أن يرفع البالون وزنًا أكبر من ذلك فهل ينتظر يومًا أكثر برودة أم أكثر دفئًا ؟

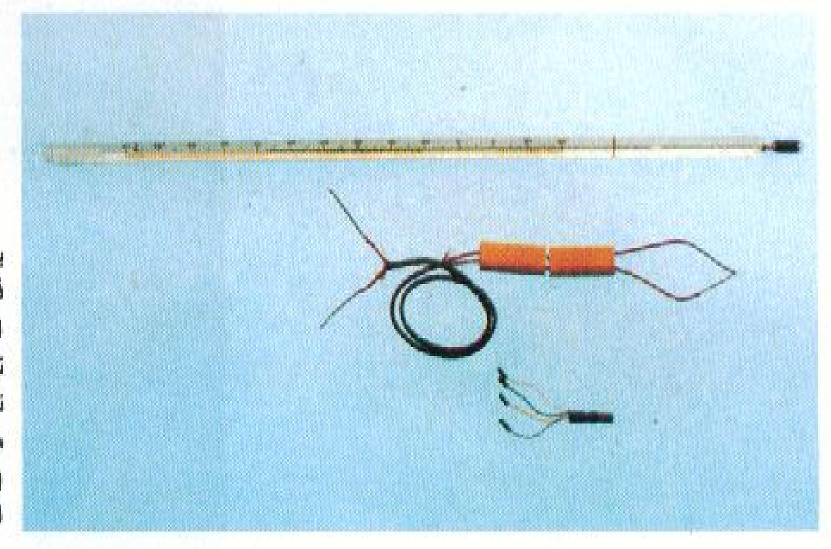


تعرفنا فى الفصل التاسع على طريقة قياس ضغط الغاز ، كما ناقشنا بعض خواص الغازات المنسابة . وسوف نوجه اهتمامنا الآن إلى مفهوم درجة الحرارة واعتماد ضغط الغاز على درجة الحرارة . علاوة على ذلك فإننا سوف نقوم باشتقاق تفسير فيزيائي أساسي لدرجة الحرارة بدلالة طاقة حركة ذرات الغاز أو جزيئاته . ويسمى النموذج الجزيئي المستخدم للحصول على هذه العلاقة **بنظرية الحركة للغازات** . لنبدأ أولاً بمناقشة درجة الحرارة بالأسلوب المألوف المرتبط بخبرتنا مع الترمومترات .

10-1 الترمومترات ومقاييس درجة الحرارة

درجة الحرارة ، كما ذكرنا فى الفصل الأول ، واحدة من الأبعاد الأساسية السبع فى الفيزياء . وبالرغم من أننا لن نعطى التعريف الرسمى الصارم لدرجة الحرارة قبل الفصل الثانى عشر ، فإنه يمكننا أن نقول بمنتهى البساطة هنا أن درجة الحرارة مقياس « لسخونة » أو « برودة » أى جسم . والدليل المألوف على أن ضغط الغاز يعتمد على درجة الحرارة هو أن ضغط الهواء فى إطارات السيارة الساخنة يكون أكبر من قيمته فى الإطارات الباردة . كذلك فإن درجة الحرارة تؤثر على حياتنا بطرق عديدة أخرى . فنحن نعتمد مثلاً على القياسات الدقيقة لدرجة حرارة الجو فى اختيار ملابسنا صيفاً أو

شتاء وكذلك في تدفئة أو تبريد مساكننا بما يتناسب مع درجة الجو المعلنة في تقارير الطقس . وتسمى الأجهزة المستخدمة لقياس درجة الحرارة **بالترمومترات** . هذه الأجهزة كثيرة ومتنوعة ، كما يمكن معايرتها طبقًا لمقاييس درجة الحرارة المختلفة .

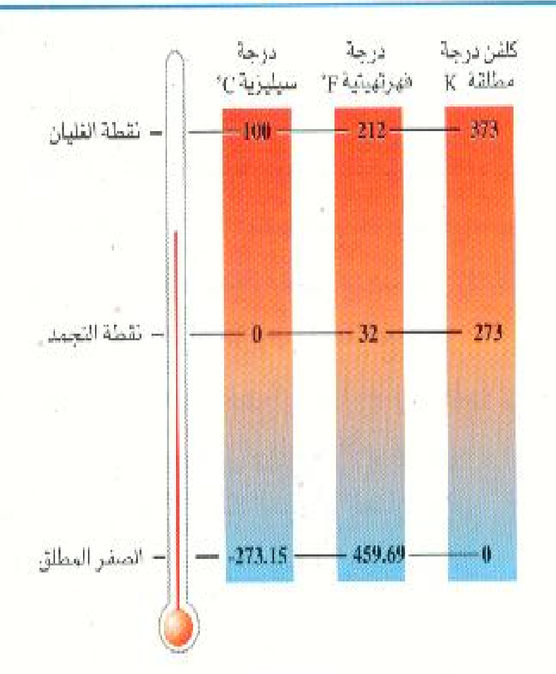


يمكن أن تستخدم الترمومترات أى خاصية فيزيائية تعتمد على درجة الحرارة . وتوضح الصورة ثلاثة أنواع من الترمومترات التى تستخدم (1) التمدد الحرارى للسائل ، (2) تغير القلطية عند وصلة من فلزين مختلفين مع درجة الحرارة (الازدواج الحرارى) ، (3) اعتماد المقاومة الكهربائية على درجة الحرارة (ترمومتر المقاومة) .

يمثل الشكل 1–10 أكثر أنواع الترمترات استعمالاً وانتشارًا . ويتركب هذا الجهاز أساسًا من أنبوبة شعرية زجاجية مغلقة يتصل أحد طرفيها ببصيلة تعمل كخزان لسائل ترمومترى كالزئبق أو الكحول . وحيث أن هذه السوائل تتمدد بزيادة درجة الحرارة فإن مستوى السائل فى الأنبوبة الشعرية سوف يرتفع بارتفاع درجة الحرارة . (يتمدد الزجاج أيضًا عندما ترتفع درجة الحرارة ، ولكن بدرجة أقل كثيرًا من السائل) . ويقسم الترمومتر بعلامات إلى أقسام بالطريقة الآتية :

تعلم على الترمومتر نقطتان مرجعيتان . النقطة الأولى تمثل موضع مستوى سطح السائل فى الأنبوبة الشعرية عندما يكون الترمومتر فى درجة حرارة خليط من الثلج والماء فى حالة الاتزان عند الضغط الجوى القياسى ؛ وهذا هو مستوى التجمد فى الشكل 1–10 . أما النقطة المرجعية الثانية فهى موضع مستوى سطح السائل فى الأنبوبة الشعرية عندما يكون الترمومتر فى نقطة غليان الماء (تحت الضغط الجوى القياسى) ؛ وهذا هو مستوى الغليان فى الشكل .

القياسان (أو التدريجان) المستخدمان غالبًا فى الحياة اليومية بالولايات المتحدة لقياس درجة الحرارة هما مقياسا **سلزيوس وفهرنهيت** . أما مقياس سلزيوس الذى اقترحه العالم السويدى أنديرس سلزيوس عام 1742) فإنه يضع نقطة تجمد الماء النقى عند 0°C (درجة سليزية) ونقطة الغليان عند 100°C مع ملاحظة أن هاتين الظاهرتين مقاستان عند الضغط الجوى القياسى . ومن ثم يوجد بين النقطتين المرجعيتين مائة درجة ، ولهذا يسمى هذا المقياس أحيانًا بالمقياس المئوى (وقد سبق للفيزيائى الألمانى جابرييل فهرنهيت أن اقترح نوعًا من المقاييس المئوية ، إذ اعتبر أن 0°F تناظر تجمد الماء المالح وأن 100°F تمثل درجة حرارة الجسم البشرى ؛



شكل 1-10 :
يمكن استخدام نقطتي غليان وتجمد الماء لإيضاح العلاقة المتبادلة بين مقاييس درجة الحرارة المعتادة الثلاثة .

والحقيقية أن درجة حرارة الجسم البشرى هى 98.6°F . ويلاحظ أن نقطتى تجمد وغليان الماء النقى على هذا المقياس هما 32°F و 212°F على الترتيب . وعليه فإن 180 درجة فهرنهيتية و 100 درجة سيليزية تغطى نفس المدى من درجات الحرارة ، ومن ثم فإن العلاقة بين مقدار (حجم) الدرجتين الفهرنهيتية والسيليزية هى $1\,°F = 100 / 180 = 5/9\,°C$. لاحظ أن الصيغة الأخيرة تمثل مدى معينا من درجات الحرارة ، بينما يعنى الرمزان °F و °C قراءة معينة لدرجات الحرارة .

المقياس الثالث لدرجات الحرارة هو **مقياس كلفن أو المقياس المطلق** ، وهو مقياس ذو أهمية عظمى يستخدم أساسًا فى المجال العلمى . ووحدة درجة الحرارة على هذا المقياس فى النظام SI هى الوحدة الأساسية وتسمى **كلفن (K)** . ويلاحظ هنا أن حجم درجة الحرارة الواحدة متساو على مقياس سلزيوس وكلفن ، فإذا تغيرت درجة بمقدار واحد كلفن (لا يقال درجة كلفن) فإن هذا يعنى تغيرها بمقدار 1°C . ومن الجدير بالذكر أن نقطتى تجمد وغليان الماء على هذا المقياس هما 273.15 K و 373.15 K على الترتيب . وهذا وسوف نرى هنا لماذا يعتبر مقياس كلفن مقياسًا ذا أهمية علمية أساسية .

هذه التعريفات التاريخية لمقاييس درجة الحرارة لم تعد سارية فى الوقت الحاضر ، وهذا ما سوف نراه فى القسم 12-10 . ومع ذلك فإن اختيار التعريفات الجديدة قد تم بحيث تظل هذه المقاييس كما هى أساسًا طبقًا للتعريفات الأصلية . ويمكننا أن نرى من الشكل 1-10 أن هناك علاقة بسيطة بين درجة الحرارة السيليزية T_C ودرجة الحرارة المطلقة (الكلفنية) T :

$$T = T_C + 273.15$$

وبالرغم من أننا لن نستخدم مقياس فهرنهيت فى هذا الكتاب ، فإنه يمكن تحويل قراءات درجة الحرارة على المقياس باستخدام المعادلتين :

$$T_C = (T_F - 32)(5/9)$$

$$T = 273.15 + ((T_F - 32)(5/9)$$

نحن نستعمل الترمومترات بشكل روتينى فى حياتنا اليومية . ومع ذلك فإن هناك قانونًا فيزيائيًا أساسيًا متعلقًا بها ربما لم نلاحظه حتى الآن . فعندما نضع الترمومتر فى حالة تلامس حميم مع جسم فإنه سرعان ما يصل إلى قراءة مستقرة تسمى درجة حرارة الجسم ، ويقال عندئذ أن الجسم والترمومتر فى حالة **اتزان حرارى** أحدهما مع الآخر . وإذا وضع هذا الجسم فى حالة تلامس مع جسم آخر ذى درجة حرارة أعلى سوف تتغير درجتا حرارة الجسمين باستمرار إلى أن يصل الجسمان فى نهاية الأمر إلى حالة اتزان حرارى عند درجة حرارة وسطية أخرى ، ويقال فى هذه الحالة أن الحرارة تنتقل من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأكثر برودة . هذه حقائق معلومة لنا جيدًا ، ولكن لنتأمل التجربة الهامة الآتية .

لنفرض أن ترمومترًا يقرأ نفس درجة الحرارة لجسمين ؛ ماذا يحدث حينما يوضع الجسمان فى حالة تلامس حميم أحدهما مع الآخر ؟ الإجابة هى : لن يحدث أى شىء ؛ ولن تتغير درجة حرارة أى من الجسمين . معنى ذلك أن الجسمين فى حالة اتزان حرارى مع بعضهما . إذن ، **الأجسام أو الأنظمة المتساوية فى درجة الحرارة تكون فى حالة اتزان حرارى مع بعضهما البعض** . هذه العبارة الواضحة هى إحدى صور **القانون الصفرى للديناميكا الحرارية** الذى يمكن كتابته فى الصورة الآتية :

النظامان أو الجسمان الموجودان كل على حدة فى حالة اتزان حرارى مع جسم ثالث يكونان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآخر .

وعليه ، تتساوى درجات حرارة الأجسام الموجودة فى حالة اتزان حرارى مع بعضها البعض .



تحتوى المجرات ، مثل هذه المجرة ، على مئات الملايين من النجوم . وهكذا فإن المول الواحد من النجوم يتكون من حوالى تريليون مجرة من هذا النوع .

10-2 المول وعدد أفوجادرو

سنناقش فى القسم التالى كيف يعتمد ضغط الغاز على درجة حرارته وكثافته . ولكن تسهيلاً للمناقشة فإننا نحتاج إلى استخدام بعض المصطلحات التى تدرس عادة فى علم الكيمياء . ونظرًا لأنه من المحتمل ألا تكون هذه المصطلحات مألوفة لك ، لنقض الآن بعض الوقت فى مناقشتها .

يسمى عدد ذرات الكربون فى كتلة قدرها 12 g من الكربون* **بعدد أفوجادرو** N_A . وقد أثبتت التجربة أن هذا العدد هو 6.02214×10^{23} ذرة لكل 12 g من الكربون ، ويستخدم هذا العدد فى تعريف مقياس لكمية أى مادة ، وهو الكمية المعروفة باسم المول (mol) :

المول من المادة هو كمية المادة التى تحتوى على عدد قدره N_A من الجسيمات .

فمثلاً ، المول الواحد من كرات البسيبول يتكون من 6.022×10^{23} كرة بيسبول . وبالمثل ، يحتوى المول الواحد من الماء على عدد قدره N_A من جزيئات الماء . وكما نرى فإن المول ليس مقياسًا للكتلة ، ولكنه مقياس لعدد الكيانات . وتلخيصًا لما سبق يمكننا كتابة :

$$\text{عدد أفوجادرو} = N_A = 6.02214 \times 10^{23} \ \text{particles per mole}$$

وحيث أن وحدة الكتلة فى النظام SI هى الكيلو جرام ووحدة المادة هى الكيلو مول ، فإننا سوف نستبدل N_A بالقيمة المكافئة ، أى أن :

$$N_A = 6.02214 \times 10^{23} \ \text{particles / mole}$$

من المهم أيضًا أن نتعرف على مصطلحين آخرين مرتبطين بالمول وهما **الكتلة الذرية والكتلة الجزيئية** ، وسوف نرمز لكليهما بالرمز M :

الكتلة الجزيئية (أو الذرية) M من مادة ما هى كتلة الكيلو مول الواحد من المادة بالكيلو جرامات .

فمثلاً ، حيث أن 12 g من الكربون 12 تحتوى طبقًا للتعريف على N_A من الذرات ، إذن 1 kmol من ^{12}C تكون كتلته الذرية $M = 12$ kg/kmol بالضبط ، وكذلك فإن قيم M التقريبية لبعض الأمثلة الأخرى هى : $M = 1$ kg/kmol للهيدروجين ؛ $M = 32$ kg/kmol لغاز الأكسجين (O_2) ؛ $M = 18$ kg/kmol للماء (H_2O) ؛ $M = 28$ kg/kmol لغاز النيتروجين . هذا ويمكنك أن تجد قيم M المضبوطة لجميع العناصر فى الملحقين 1 و 2 .

مثال توضيحى 10-1

الكتلة الذرية للنحاس 63.5 kg/koml . أوجد كتلة ذرة نحاس واحدة .

---

* فى 12 g من النظير carbon-12 بالتحديد .

استدلال منطقى : بما أن $M = 63.5$ kg/kmol ، إذن 63.5 kg من النحاس تحتوى على 6.022×10^{26} من الذرات . وعليه فإن كتلة ذرة واحدة هى :

$$\text{الكتلة لكل ذرة} = \frac{63.5\ \text{kg}}{6.022\times10^{26}\ \text{atoms}} = 1.05\times10^{-25}\ \text{kg/atom}$$

ويمكن استخدام نفس هذه الطريقة لإيجاد كتلة أى ذرة أو جزئ بمعلومية M وحيث أن M كيلو جرامًا تحتوى على N_A كيانًا ، إذن :

$$\text{الكتلة لكل كيان} = \frac{M}{N_A}$$

تمرين : أوجد كتلة جزئ الأكسجين O_2 . **الإجابة :** 5.31×10^{-26} .

مثال 10-1 :

أوجد الحجم المرتبط بذرة زئبق فى الزئبق السائل علمًا بأن $\rho = 13{,}600$ kg/m³ و $M = 201$ kg/kmol للزئبق .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الفرض الذى يمكن استخدامه فيما يتعلق بتوزيع الذرات فى الزئبق السائل ؟

الإجابة : حيث أننا نتحدث عن الزئبق ، يمكننا أن نفرض أن الذرات « متلامسة » مع بعضها البعض . وهكذا فإن الحجم لكل ذرة يمكن حسابه بإيجاد النسبة بين الحجم الكلى لعينة ما والعدد الكلى للذرات فى هذه العينة .

سؤال : ما هى العينة الممكن إجراء الحسابات بالنسبة لها ؟

الإجابة : أنسب عينة هنا هى الكيلو مول الواحد لأننا نعلم أنها تحتوى على عدد قدره N_A من الذرات .

سؤال : كيف يمكن إيجاد حجم 1 kmol ؟

الإجابة : نحن نعلم كثافة الزئبق وقيمة M للزئبق ، وعليه يمكن حساب عدد المليمترات المكعبة لكل كيلو مول من الزئبق . لاحظ أن :

$$\frac{\text{الحجم}}{\text{kmol}} = \frac{M(\text{kg/kmol})}{\rho(\text{kg/m}^3)}$$

سؤال : كيف نوجد حجم الذرة الواحدة ؟

الإجابة : حجم الذرة الواحدة يساوى $1/N_A$ مضروبًا فى الحجم لكل كيلو مول .

الحل والمناقشة : بالتعويض بالقيم العددية :

$$\frac{\text{الحجم}}{\text{kmol}} = \frac{201\ \text{kg/kmol}}{1.36\times10^{4}\ \text{kg/m}^3}$$

$$= 1.48 \times 10^{-2}\ \text{m}^3/\text{kmol}$$

إذن :

$$\frac{\text{الحجم}}{\text{ذرة}} = \frac{1.48\times10^{-2}\ \text{kg/kmol}}{6.022\times10^{26}\ \text{atoms/kmol}}$$

$$= 2.45 \times 10^{-29}\ \text{m}^3/\text{atom}$$

ولكى نتخيل مدى صغر هذا الحجم سوف نستخدم الصيغة الرياضية لحجم الكرة فى حساب نصف قطر كل ذرة . هذه الصيغة على الصورة : $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. إذن :

$$r = \left(\frac{3\times2.45\times10^{-29}}{4\pi}\right)^{1/3} = 1.8\times10^{-10}\ \text{m}$$

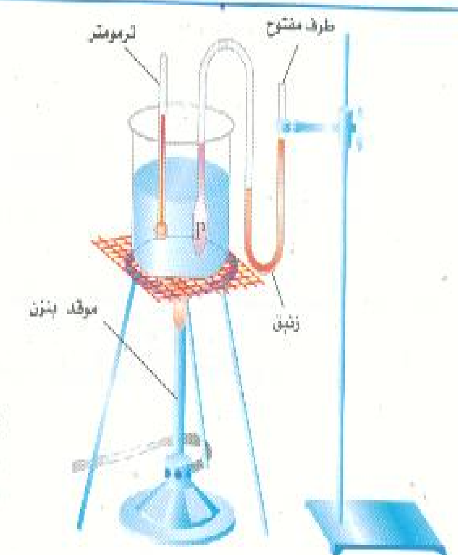
وبالطبع فإن قطر الذرة ضعف هذه الكمية ، أى 3.6×10^{-10} . وهكذا فإن قطر إحدى أثقل الذرات يساوى حوالى $0.36\ nm$ فقط . أى أنه إذا تراصت مليون ذرة من الزئبق جنبًا إلى جنب فى خط مستقيم فإنها ستشغل حيزًا طوله 0.36 mm فقط !

10-3 قانون الغاز المثالى

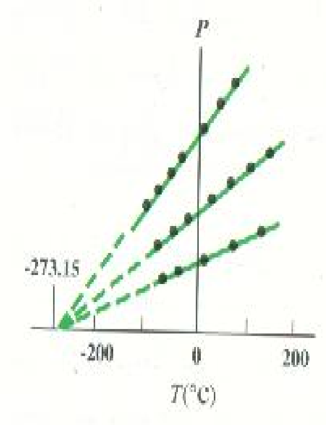
لفهم طبيعة درجة الحرارة كخاصية فيزيائية اهتم بعض الباحثين الأوائل بدراسة كيفية تغير ضغط الغاز مع درجة الحرارة . وقد أجريت التجارب الحاسمة فى هذا المجال من قرون عديدة ، وما زال الطلاب يقومون بإجراء هذه التجارب الأساسية فى مختبراتهم حتى اليوم . ويمثل ؛ الشكل 2–10 تجهيزة معملية بسيطة لمثل هذا الغرض . وهنا يقاس ضغط الغاز كدالة فى درجة الحرارة عند ثبوت حجم الغاز . وعند تمثيل نتائج مثل هذه التجربة بيانيًا سوف نحصل على منحنيات كالمبينة بالشكل 3–10 .



يزداد حجم الفقاعات الغازية كلما ارتفعت إلى أعلى تجاه سطح السائل . لماذا ؟



شكل 2–10 :
جهاز بسيط لقياس تأثير درجة الحرارة على ضغط الغاز عند ثبوت حجمه .



شكل 3–10 :
يقل ضغط الغاز غير الكثيف بانخفاض درجة الحرارة عند ثبوت الحجم (قانون جاى – لوساك) . المنحنيات الثلاثة تنتمي إلى نفس الغاز ، ولكن كمية الغاز في الحجم الثابت مختلفة .

واضح من الشكل أن هناك علاقة خطية بين الضغط المطلق (مدلول ضغط المقياس زائد P_a) ودرجة الحرارة ، مع ملاحظة أن الخطوط المستقيمة المختلفة تناظر شروطًا ابتدائية مختلفة للغاز داخل الوعاء . ومع ذلك يلاحظ في جميع الحالات وجود علاقة خطية بين درجة الحرارة والضغط عند ثبوت الحجم ، **بشرط أن يكون الغاز بعيدًا عن شروط التكثف أو الإسالة** .

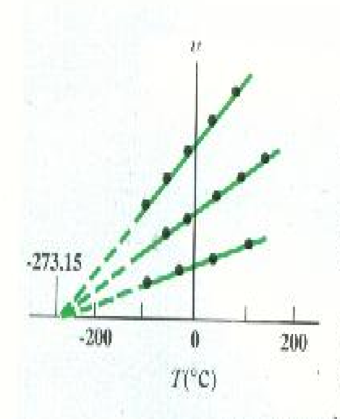
التجربة الهامة الأخرى هي قياس حجم غاز كدالة في درجة حرارته مع حفظ ضغطه ثابتًا . ويمثل الشكل 4–10 الرسم البياني النمطي للحجم مقابل درجة الحرارة . وهنا أيضًا توجد علاقة خطية : يزداد الحجم خطيًا مع درجة الحرارة عند ثبوت الضغط . ومرة ثانية ، هذا صحيح طالما كان الغاز بعيدًا عن شروط إسالته .

هناك كذلك سمة هامة أخرى يوضحها الشكلان 3–10 و 4–10 : **تتلاقى امتدادات جميع الخطوط المستقيمة عند نفس درجة الحرارة وهي $-273.15°C$** .

يمكن تمثيل العلاقتين التجريبيتين السابقتين رياضيًا كما يأتي :

$$P = (\text{constant})(T_c + 273.15\ C°)$$ (عند ثبوت V)

$$V = (\text{constant})(T_c + 273.15\ C°)$$ (عند ثبوت P)



شكل 4–10 :
يتغير حجم الغاز غير الكثيف خطيًا مع درجة الحرارة عند ثبوت P (قانون شارل) . المنحنيات الثلاثة تنتمي إلى نفس الغاز ، ولكن عند ضغوط مختلفة .

ويجب أن نؤكد هنا أن السلوك الذى تمثله المعادلتان السابقتان ينطبق على **أى** غاز مثالى . ويلاحظ من هاتين المعادلتين أن P أو V يصل إلى الصفر عندما $T_c = -273.15°C$. وتعرف درجة الحرارة الفريدة التي يحدث عندها ذلك **بالصفر المطلق** ، وهي تمثل أساس مقياس كلفن لدرجة الحرارة السابق ذكره في الجزء 1–10 . ولكن الحصول على نتائج عملية بالقرب من الصفر المطلق أمر مستحيل بالنسبة لمعظم الغازات وذلك لأنها تتكثف وتتحول إلى الحالة السائلة عند درجات حرارة أعلى من هذه بكثير . ومع ذلك فإن وجود درجة الحرارة الفريدة هذه يرجح أن لها أهمية أساسية من نوع ما ، وهذا ما سوف نناقشه بتفصيل أكثر فيما بعد .

وأخيرًا تبين سلسلة أخرى من التجارب أنه عند ثبوت T وتغيير P أو V فإن حاصل الضرب PV يظل ثابتًا طبقًا للمعادلة الآتية :

$$PV = (\text{constant})\ (\text{كمية الغاز})\ (T_c + 273.15\ C°)$$

ويمكنك أن تتحقق بنفسك أن هذه المعادلة تتفق مع المعادلتين الأخريين .

تقاس كمية الغاز فى العينة عادة بعدد المولات n الذى يعطى بالعلاقة :

$$n = \frac{m}{M}$$

حيث m كتلة عينة الغاز ، M الكتلة الذرية أو الجزيئية للغاز . أما الثابت فى معادلة PV السابقة فهو أحد الثوابت الفيزيائية العامة الذى يجب أن تعين قيمته عمليًا . هذا الثابت يسمى **ثابت الغازات** ويرمز له دائمًا بالرمز R . وباستعمال جميع الرموز السابقة فى معادلة PV نحصل على :

$$PV = nRT \qquad (10\text{–}1)$$

حيث T هى درجة الحرارة المطلقة : $T = T_c + 273.15\ C°$.

العلاقة السابقة تسمى **قانون الغاز المثالى ، وتسمى الغازات التى تتبع هذا القانون بالغازات المثالية** . وقد وجد أن جميع الغازات تسلك هذا السلوك المثالى طالما كانت بعيدة عن الظروف التى يحدث عندها تكثف الغاز وتحوله إلى الحالة السائلة . هذا وقد أثبتت القياسات العملية المتكررة أن قيمة R بالوحدات SI هى :

$$R = 8314\ J/kmol.K = 8.314\ J/mol.K$$

وعليك أن تتأكد بنفسك أن وحدات R متسقة مع وحدات الكميات الأخرى فى المعادلة (10–1) .

10–4 استخدام قانون الغاز المثالى

بعد أن تعرفنا على معنى الكميات المختلفة فى قانون الغاز المثالى يمكننا الآن تطبيقه فى حل مختلف المسائل . ويجب عند استعمال هذا القانون مراعاة الانتباه الشديد فيما يتعلق بوحدات الكميات المختلفة . **فدرجة الحرارة T يجب أن تكون مقاسة بالدرجات المطلقة** . وفى نظام الوحدات SI يقاس الضغط P بالباسكال (أى N/m^2) ويقاس الحجم بالأمتار المكعبة (m^3) . وفى هذه الحالة تكون قيمة R هى إحدى القيم المعطاة فى القسم 3–10 ، وهذا يتوقف على ما إذا كان n بالمولات (mol) أو الكيلو مولات (kmol) .

مثال 2-10 :

الضغط الجوى القياسى ودرجة الحرارة القياسية هما 1.01325×10^5 Pa و $0.000\ C°$. (معدل الضغط ودرجة الحرارة يعنى نفس هذا المعنى) . أوجد الحجم الذى يشغله 1.000 kilomole من غاز مثالى عند هاتين القيمتين للضغط P ودرجة الحرارة T .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى يتعين به الحجم ؟

الإجابة : قانون الغاز المثالى يربط بين كميات أربع هى n ، T ، V ، P . فـإذا علم ثـلاث من هذه الكميات يمكن حل معادلة الغاز المثالى بالنسبة للكمية الباقية .

سؤال : كيف تترجم المعطيات إلى الرموز المستخدمة فى قانون الغاز المثالى ؟

الإجابة : تقول المعطيات أن $T_c = 0.000\ C°$ ، ولذلك يجب تحويلـها إلى درجة حرارة كلفنية ، $T = 273.15 + T_c = 273.15\ K$. كذلك فإن $P = 1.000\ atm = 1.013 \times 10^5\ Pa$ و $n = 1.000\ kmol$.

الحل والمناقشة : يمكن حل قانون الغاز المثالى جبريًا بالنسبة إلى V :

$$V = \frac{nRT}{P}$$

ومن المعطيات نجد أن V (لأربعة أرقام معنوية) يساوى :

$$V = (1.000\ kmol)(8314\ J/kmol.K)(273.15\ K)/(1.013 \times 10^5\ Pa)$$
$$= 22.42\ m^3/kmol$$

تحفظ هذه الكمية عن ظهر قلب .

الكيلو مول الواحد من أى غاز مثالى يشغـل حجمًا قـدره $22.4\ m^3$ عند معدل الضغط ودرجة الحرارة .

مثال 3-10 :

إذا حبس $14.0\ mg$ من غاز النيـتروجين ($M = 28.0\ kg/kmol$) فـى وعـاء حجمـه $5.00 \times 10^3\ cm^3$ عند $27.0°C$ ، فما ضغط الغاز فى الوعاء ؟

استدلال منطقى :

سؤال : هل لدينا المعطيات الكافية لحل قانون الغاز المثالى بالنسبة إلى P ؟

الإجابة : لدينا قيمة M ، m ، V ، T_c . وحيث أن $m/M = n$ ، إذن لدينـا ثـلاث كميات معلومة من الكميات الأربع .

سؤال : هل الوحدات معطاة كلـها فى النظام SI ؟

الإجابة : لا . يجب تحويل T_c إلى T وتحويل V إلى أمتار مكعبة وتحويل m إلى كيلو جرامات .

الحل والمناقشة : لحل قانون الغاز المثالى بالنسبة إلى P يجب كتابته على الصورة :

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{m}{M}\frac{RT}{V}$$

قيم الكميات المعلومة بالوحدات SI تكون :

$$T = 27.0 + 273 = 300\ K \qquad m = 14.0 \times 14^{-6}\ kg \qquad V = 5.00 \times 10^{-3}\ m^3$$

إذن :

$$P = \frac{(14.0 \times 10^{-6}\ kg)(8314\ J/kmol.K)(300\ K)}{(28.0\ kgkmol)(5.00\ \times 10^{-3}\ m^3)}$$

$$= 249\ N/m^2 = 249\ Pa$$

مثال 10-4 :

استخدم قانون الغاز المثالى لتعيين كتلة الهواء الموجود فى دورق حجمه $50.0\ cm^3$ عند ضغط قدره 700 torr ودرجة حرارة قدرها 20°C . يتكون الهواء من النيتروجين N_2 والأكسجين O_2 بنسبة كتلية تقريبية قدرها % 80 و % 20 على الترتيب .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن إيجاد قيمة m بمعلومية T_c ، V ، P ؟

الإجابة : ما لدينا من المعطيات يكفى للحصول على قيمة n ، ولكن لإيجاد m يجب أن نعلم أيضًا الكتلة الجزيئية M .

سؤال : الهواء خليط من غازين حسب نص المسألة ، كيف إذن يمكن إيجاد M ؟

الإجابة : نعلم من القسم 2–10 أن : $M(N_2) = 28\ kg/kmol$

و $M(O_2) = 32\ kg/kmol$ ، كما نعلم أيضًا النسبة المئوية لكل من الغازين فى الخليط . إذن :

$$M(air) = (0.80)(28\ kg/kmol) + (0.20)(32\ kg/kmol)$$

$$= 29\ kg/koml$$

سؤال : ما قيمة الكميات الأخرى بالوحدات SI ؟

الإجابة :

$$T = 273 + 20 = 293\ K$$

$$P = (1.103 \times 10^5\ Pa/atm)(700\ torr)(760\ torr/atm)$$

$$= 9.33 \times 10^4\ Pa$$

$$V = 50.0 \times 10^{-6}\ m^3$$

الحل والمناقشة : يمكن كتابة قانون الغاز المثالى بدلالة m على الصورة $PV = (m/M)RT$. وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى m :

$$m = \frac{PVM}{RT}$$

$$= (9.33 \times 10^4\ Pa)(50.0 \times 10^{-6}\ m^3)\ \frac{(29\ kg/kmol)}{(8314\ J/kmol\ K)(293\ K)}$$

$$= 5.5 \times 10^{-5}\ kg$$

مثال 10-5 :

أغلق برميل زيت فارغ (إلا من الهواء) عند درجة حرارة قدرها 20°C ثم ترك بعد ذلك فى الشمس فارتفعت درجة حرارته إلى 60°C . فإذا كان الضغط الابتدائى 1.0 atm ، فما هو الضغط النهائى فى البرميل ؟ افترض أن حجم البرميل يظل ثابتًا عند تغير درجة الحرارة .

استدلال منطقى :

سؤال : نحن لا نعلم قيمة كل من n و V . هل توجد طريقة لاستخدام قانون الغاز المثالى بدون حله صراحة بالنسبة إلى هاتين الكميتين ؟

الإجابة : نعم ، فنحن نعلم أن n و V ثابتان لأن حجم البرميل لا يتغير مع درجة الحرارة ، كما أن n ثابت لأن البرميل محكم الغلق لا يتسرب منه الهواء . هذا الشرط يمكننا من استخدام قانون الغاز المثالى فى صورة نسبة بين الكميات قبل وبعد التسخين . عندئذ يمكن اختصار كل من R ، V ، n فى بسط ومقام النسبة .

سؤال : كيف تكون هذه النسبة ؟

الإجابة : يكتب قانون الغاز المثالى مرتين ، مرة بالنسبة للحالة الابتدائية والأخرى بالنسبة للحالة النهائية .

$$P_1V = nRT_1 \quad \text{و} \quad P_2V = nRT_2$$

وبقسمة المعادلة الأولى على الثانية نحصل على النتيجة البسيطة الآتية :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

سؤال : هل يجب أن تكون كل هذه الكميات مقاسة بالوحدات SI ؟

الإجابة : يجب دائمًا أن تكون درجات الحرارة T مقاسة على مقياس كلفن . هذا لأن T ترتبط بكل من T_c و T_F بعلاقة **جمع عددى** ، ولذلك لا تختصر فى النسبة . أما جميع الكميات الأخرى (n ، V ، T) فيمكن التعبير عنها فى النسبة بأى وحدات نريد لأن معاملات التحويل بالضرب سوف تختصر فى النسبة . ولكن يجب التأكد من أن هذه الكميات مقدرة بنفس الوحدات فى الحالتين الابتدائية والنهائية .

الحل والمناقشة : من معطيات المسألة نجد أن $T_1 = 20 + 273 = 293\ K$ و $T_2 = 60 + 273 = 333\ K$. ونعلم أيضًا أن $P_1 = 1.0\ atm$. إذن :

$$P_2 = P_1\frac{T_2}{T_1} = \frac{(1.0\ atm)(333\ K)}{293\ K} = 1.1\ atm$$

لاحظ أن استخدام T_c يعطى نتيجة مختلفة وغير صحيحة فى نفس الوقت .

مثال 10-6 :

يعطى مقياس الضغط قراءة قيمتها 190 kPa للضغط فى إطار سيارتك فى يوم درجة حرارته 10°C- وضغطه البارومترى 800 torr . ماذا تكون قراءة مقياس الضغط بعد

قيادتك للسيارة وارتفاع درجة حرارة الإطار (والهواء الموجود فيه) إلى 35°C ؟ افترض أن حجم الإطار لا يتغير .

استدلال منطقى :

سؤال : هناك تشابه كبير بين هذه المسألة والمثال السابق . هل يمكن استخدام مدلول ضغط المقياس مباشرة فى قانون الغاز المثالى ؟

الإجابة : لا لنفس السبب الذى يمنع استعمال T_c مباشرة . ذلك أن الضغط فى قانون الغاز المثالى هو الضغط الكلى ، وهو يختلف عن P_G بمقدار جمعى . كذلك يمكن استخدام أى وحدات فى النسبة ، ولكن الضغطين يجب أن يكونا هما الضغطان الكليان وليس مدلولى ضغط المقياس .

سؤال : ما هو الضغط الكلى الابتدائى ؟

الإجابة :

$$P_1 = P_a + P_G$$
$$= (800/760)(1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) + 1.90 \times 10^5 \text{ Pa}$$
$$= (1.06 + 1.90) \times 10^5 \text{ Pa} = 2.96 \times 10^5 \text{ Pa}$$

سؤال : ما هى المعادلة الممكن استخدامها لتعيين P_2 ؟

الإجابة : $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$ أو $P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1}$

حيث $T_1 = 273 + (-10) = 263 \text{ K}$ ، $T_2 = 35 + 273 = 308 \text{ K}$

الحل والمناقشة : باستخدام البيانات نحصل على :

$$P_2 = (2.96 \times 105 \text{ Pa})(308/263) = 3.47 \times 10^5 \text{ Pa}$$

تذكر أن هذا هو الضغط الكلى . ولإيجاد قراءة المقياس يجب طرح Pa :

$$(P_2)_G = 3.74 \times 10^5 \text{ Pa} - (1.06 \times 10^5 \text{ Pa})$$
$$= 241 \text{ kPa}$$

مثال 10-7 :

يقوم محرك الديزل بحرق خليط الوقود والهواء بالتسخين الانضغاطى وليس باستخدام شمعات الإشعال . ولتوضيح هذه الظاهرة لنعتبر محرك ديزل نسبته انضغاطه 1 : 18 . هذا يعنى أنه عند تشغيل المحرك يقوم الكباس بتغيير حجم الأسطوانة من حجم ابتدائى قدره V_1 إلى حجم نهائى قدره $V_2 = \frac{1}{18} V_1$. لنفرض أن خليط الوقود الغازى والهواء يدخل الأسطوانة عند درجة حرارة قدرها 300 k وضغط قدره 740 torr عندما يكون حجم الأسطوانة V_1 . ما هى درجة حرارة الغاز بعد أن يغير الكباس حجم الأسطوانة إلى V_2 . ويرتفع الضغط فيها إلى 37,000 torr ؟

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن استخدام قانون الغاز المثالى فى صورة نسبة مرة أخرى ؟

الإجابة : نعم . فبالرغم من أن T ، V ، P تتغير جميعًا ، فإنها تتغير بحيث تظل الكمية PV/T ثابتة ($PV/T = nR$) .

سؤال : ما هى معادلة النسبة بين درجتى الحرارة ؟

الإجابة : العلاقة $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ تعطينا :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$$

الحل والمناقشة : من المعادلة السابقة نجد أن :

$$T_2 = T_1 \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$$

$$= 300\text{ K}\left(\frac{37{,}000\text{ torr}}{740\text{ torr}}\right)\left(\frac{1}{18}\right) = 833\text{ K}$$

ودرجة الحرارة هذه كافية لإشعال الوقود .

10-5 الأساس الجزيئى لقانون الغاز المثالى

قانون الغاز المثالى $PV = nRT$ يعبر عن ضغط الغاز المثالى بدلالة درجة حرارته . لنناقش الآن ببعض التفصيل ماذا نعنى بالغاز المثالى . نحن نعلم أن الغاز يتكون من ذرات أو جزيئات مادة (أو خليط من المواد) ، وأن هذه الجزيئات تتحرك بحرية لتملأ أى حجم يحتويها . وبشيء من الدقة يمكن تعريف الغاز المثالى بأنه ذلك الغاز الذى يحقق الشروط الآتية :

1 ـ يمكن معاملة ذرات أو جزيئات الغاز على أنها كتل **نقطية** ، بمعنى أن حجمها مهمل بالنسبة إلى حجم الإناء V الذى يحتوى على الغاز .

2 ـ لا توجد أى قوى محسوسة بين الذرات أو الجزيئات ، باستثناء اللحظات التى تتصادم فيها مع بعضها البعض أو لحظات التصادم مع جدران الإناء . وسوف يفترض أن كل هذه التصادمات **تامة المرونة** .

سوف نقوم الآن باشتقاق علاقة بين درجة حرارة الغاز والخواص الميكانيكية لجزيئاته . وللحصول على هذه العلاقة سوف نستخدم هنا نموذجًا مبسطًا يعرف باسم **نظرية الحركة للغازات** .

وكبداية لهذا الموضوع علينا الرجوع إلى المثال 6–7 . لقد استخدمنا فى ذلك المثال مبدأى بقاء الطاقة وكمية التحرك لإثبات أن حزمة الجسيمات تمارس ضغطًا على الجدار الذى تتصادم معه . كذلك فإننا افترضنا أن جميع الجسيمات متساوية الكتلة m

والسرعة v ، وافترضنا بالإضافة إلى ذلك أن التصادمات جميعها تامة المرونة . وعندئذ وجدنا أن الضغط على الجدار يمكن كتابته على الصورة :

$$P = 4(\text{KE})n_v$$

حيث KE هي طاقة حركة الجسيمات (وهي جميعًا متساوية الطاقة) و $n_v = N/V$ هو عدد الجزيئات لوحدة الحجم في الحزمة . (استبدلنا الرمز n الذي استخدمناه بدون دليل سفلي في الفصل السادس بالرمز n_v لتمييزه عن عدد المولات) .

ولكي تمثل هذه النتيجة الضغط الذي تؤثر به جزيئات عند درجة حرارة T على جدار الإناء، بدلاً من الضغط الناشيء عن حزمة موجهة من الجسيمات فإننا نحتاج إلى إجراء بعض التغييرات البسيطة . وتتضمن هذه التغييرات الاعتبارات الآتية :

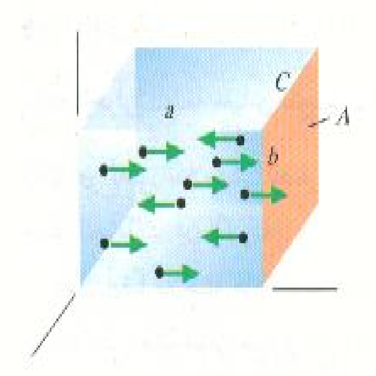
1 ـ جزيئات الغاز لا تتحرك جميعها بنفس مقدار السرعة . وفي هذا تختلف جزيئات الغاز عن جسيمات الحزمة . ومع ذلك يمكن وصف الغاز وصفًا ملائمًا بدلالة **متوسط** سرعة الجزيئات . ومن ثم فسوف يعبر عن ضغط الغاز بدلالة **متوسط** KE لجزيئاته .

2 ـ في حالة الغاز تتحرك الجسيمات في جميع الاتجاهات في ثلاثة أبعاد . وحيث أن جميع الاتجاهات في الفراغ متكافئة وليس هناك اتجاه مفضل على آخر ، فإن متوسط سرعة الجزيئات في الاتجاهات الثلاثة z ، y ، x لابد أن يكون متساويًا . هذا يعني أن إسهام كل من مركبات الحركة الثلاث في متوسط طاقة الحركة (KE) سيكون متساويًا :

$$\overline{\frac{1}{2}mv_x^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_z^2}$$

و :

$$\overline{\frac{1}{2}mv_x^2} + \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} + \overline{\frac{1}{2}mv_z^2} = \overline{\frac{1}{2}mv^2} = \overline{\text{KE}}$$



شكل 5-10 :
لن يصطدم بالمساحة A إلا نصف عدد الجزيئات فقط (وهي الجزيئات المتحركة في الاتجاه الموجب للمحور x) .

ومن هاتين العلاقتين يمكن كتابة :

$$\overline{\frac{1}{2}mv_x^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_z^2} = \frac{1}{3}\overline{\text{KE}}$$

3 ـ ولنفس السبب المذكور في البند 2 عاليه لابد أن يتساوى متوسط عدد الجسيمات المتحركة في الاتجاه الموجب لكل من المحاور z ، y ، x مع متوسط عددها الذي يتحرك في الاتجاهات السالبة . لنعتبر الآن جدار الإناء العمودي على الجزء الموجب من المحور x (شكل 5-10) . في هذه الحالة لن يتصادم مع هذا الجدار سوى تلك الجزيئات المتحركة في الاتجاه الموجب للمحور x فقط ، ومن ثم فإن الضغط سوف ينشأ نتيجة لتصادم هذه الجزيئات مع الجدار . بناء على ذلك يمكننا إثبات أن متوسط طاقة حركة هذه الجزيئات يساوي $\frac{1}{6}\left(\overline{\frac{1}{2}mv_x^2}\right)$ أو $\frac{1}{6}\overline{\text{KE}}$.

وعليه فإن التعديلات اللازم إجراؤها فى نتيجة المثال 6-7 تتلخص فى إحلال متوسط طاقة حركة جزيئات الغاز $\frac{1}{6}\overline{\text{KE}}$ محل طاقة حركة حزمة الجزيئات KE . وهكذا ، فبدلاً من العلاقة $P = 4(\text{KE})n_v$ فى حالة الحزمة الجسيمية سنجد فى حالة الغاز المثالى أن :

$$P = 4\left(\frac{1}{6}\right)\overline{(\text{KE})}n_v = \frac{2}{3}\overline{(\text{KE})}n_v \qquad (10\text{-}2)$$

الآن أصبحنا فى وضع يمكننا من تفسير درجة الحرارة بدلالة متوسط طاقة حركة جزيئات الغاز . فبمساواة الضغط المعطى بالمعادلة (10-2) بضغط الغاز المعطى بقانون القانون الغاز المثالى نحصل على :

$$\frac{2}{3}\overline{(\text{KE})}n_v = \frac{nRT}{V}$$

سنقوم الآن بالتوفيق بين بعض هذه الرموز . حيث أن عدد المولات n يرتبط بالعدد الكلى للجزيئات N طبقاً للعلاقة $n = N/N_A$ ، $n/V = (N/V)/N_A = n_v/N_A$ ؛ وباستعمال هذه التعويضات وإجراء بعض العمليات الجبرية البسيطة يمكننا كتابة :

$$\overline{\text{KE}} = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T = \frac{3}{2}kT \qquad (10\text{-}3)$$

حيث $k = R/N_A$ يسمى **ثابت بولتزمان** وقيمته العددية كما يأتى :

$$k = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/k}$$

المعادلة (10-3) تمثل إحدى أهم نتائج نظرية الحركة للغازات ، فهى تعنى أن درجة حرارة الغاز مقياس لمتوسط طاقة حركة جزيئات الغاز .

درجة الحرارة المطلقة مقياس لمتوسط طاقة الحركة الانتقالية للجزيئات فى الغاز المثالى .

لاحظ أن المعنى الكلاسيكى للصفر المطلق (OK) هو أنه درجة الحرارة التى تتوقف عندها الجزيئات عن الحركة .

هناك أيضًا ملاحظة هامة ثانية تتعلق بمعنى الاتزان الحرارى . ولعلنا نذكر أن المواد الموجودة فى حالة اتزان حرارى مع بعضها البعض تكون متساوية فى درجة الحرارة .

إذا وجد غازان مثاليان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآن فإن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل جزئ يكون واحدًا فى كلا الغازين .

وهذا صحيح سواء كان تركيب الغاز متجانسًا أم لم يكن .

لنتقدم الآن خطوة أخرى إلى الأمام ونقوم بحساب متوسط v^2 للجزيئات بفرض أن جميع الجزيئات لها نفس الكتلة m يمكننا كتابة :

$$\overline{\text{KE}} = \overline{\frac{1}{2}mv^2} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \qquad (10\text{-}4)$$

ومنه نجد أن :

$$\overline{v^2} = 3kT / m$$

وإذا أخذنا الجذر التربيعى لهذه الكمية فإننا نحصل على نوع من السرعة المتوسطة يسمى جذر متوسط مربع السرعة v_{rms} :

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \qquad (10\text{-}5)$$

السرعة rms **ليست** هى السرعة المتوسطة العادية ، **بل إنها سرعة جزئ طاقة حركته تساوى متوسط طاقة حركة الجزيئات** . ومن الأهمية بمكان أن نفهم أن هذه القيمة للسرعة تمثل متوسط سرعة الجزيئات بين التصادمات ، فالتصادمات تؤدى دائمًا إلى اعتراض حركة الجزيئات وتغيير اتجاهاتها .

وبالرغم من أن هذه النصوص والعبارات تنطبق على الغاز المثالى فقط ، فإننا سنرى فى فصول لاحقة أن درجة الحرارة المطلقة مقياس لطاقة الحركة لكل جزئ حتى فى حالة السوائل والغازات . ومع ذلك فهى ليست مقياسًا بسيطًا .

وقبل أن نترك هذا القسم نود أن نوضح أن هذه النتائج تنطبق على الغازات الحقيقية عند درجات الحرارة العالية والمتوسطة فقط . ذلك أنه يلاحظ حدوث أشياء فى منتهى الغرابة بالقرب من الصفر المطلق ؛ فبعض الفلزات تتحول إلى موصلات كهربائية عديمة المقاومة ، كما يتحول انسياب بعض الموائع إلى انسياب لا احتكاكى تمامًا (أى أن لزوجتها تصبح صفرًا) . هذا السلوك الشاهد للجزيئات عند درجات الحرارة المنخفضة يجب معالجته باستخدام ميكانيكا الكم ، وهو الموضوع الذى سنناقشه فى الفصول القليلة الأخيرة من هذا الكتاب وكذلك فى بعض « وجهات النظرية الحديثة » التى نجدها تباعًا خلال الكتاب .

مثال توضيحى 2–10

ما قيمة جذر متوسط مربع سرعة جزئ النيتروجين عند 27.0°C ؟

استدلال منطقى : لاستخدام المعادلة (5–10) يجب معرفة كتلة الجزئ ودرجة الحرارة . ونحن نعلم أن الكتلة لكل جزئ هى الكتلة الجزيئية للغاز M مقسومة على عدد الجزيئات لكل مول N_A . وحيث أن الكتلة الجزيئية للنيتروجين N_2 تساوى 28.0 kg/kmol ، إذن :

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{28.0\ \text{kg/kmol}}{6.02 \times 10^{26}\ /\text{kmol}} = 4.65 \times 10^{-26}\ \text{kg}$$

وباستعمال المعادلة (5–10) نجد أن :

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K})(300\ \text{K})}{4.65 \times 10^{-26}\ \text{Kg}}} = 517\ \text{m/s}$$

لاحظ أن هذه سرعة عالية جدًا فهى تساوى ثلث الميل لكل ثانية ! وبناء على ذلك ،

هل يمكنك تفسير لماذا تستغرق رائحة غاز ما ، جزيئات العطر مثلاً - زمنًا طويلاً لانتقالها خلال الغرفة ؟

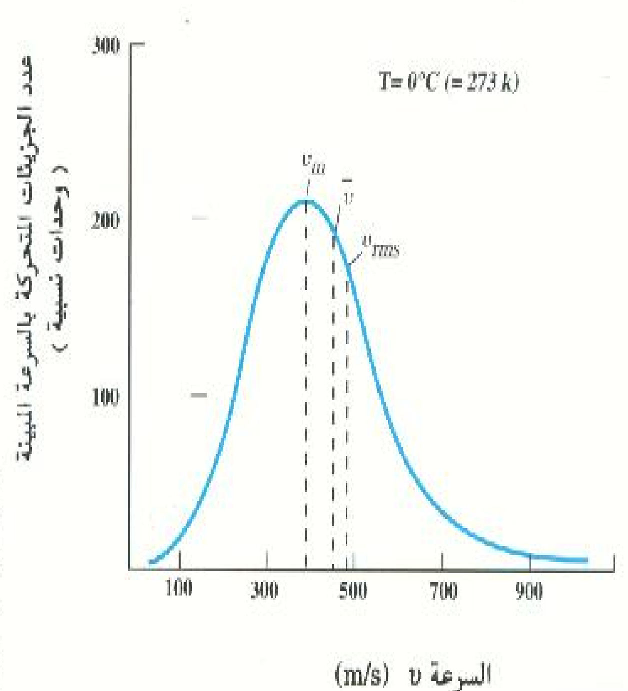
10-6 توزيع السرعات الجزيئية

في القسم السابق افترضنا ضمنيًا أن جزيئات الغاز لا تتحرك جميعها بنفس السرعة ، ولكننا لم نحدد توزيع هذه السرعات ، بمعنى أننا لم نذكر النسبة العددية للجزيئات التي تتحرك بسرعة معينة أو في مدى معين للسرعة . وقد استخدم الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كليرك ماكسويل نظرية الحركة للغازات في عام 1860 لاشتقاق تعبير نظري لوصف العدد النسبي من جزيئات الغاز الذي يتحرك بسرعة معينة عند درجة حرارة معينة T . هذه العلاقة تسمى **توزيع ماكسويل** ، وهي موضحة بيانيًا بالشكل 6-10 لجزيئات غاز O_2 عند درجة 273 K . لاحظ أن هناك سرعتين أخريين ، بالإضافة إلى v_{rms} ، مبينتين على المنحنى ، وهاتان السرعتان مهمتان من الناحية الإحصائية . السرعة الأولى وهي v_m تسمى **السرعة الأكثر احتمالاً** ، وهي تمثل السرعة التي يتحرك بها أكبر عدد من الجزيئات . أما السرعة الثانية $\bar{v}$ فهي **السرعة المتوسطة للجزيئات** . وتعطى هذه السرعات الثلاث بالمعادلات الآتية :

$$v_m = \sqrt{2}\sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.414\sqrt{\frac{kT}{m}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.596\sqrt{\frac{kT}{m}}$$

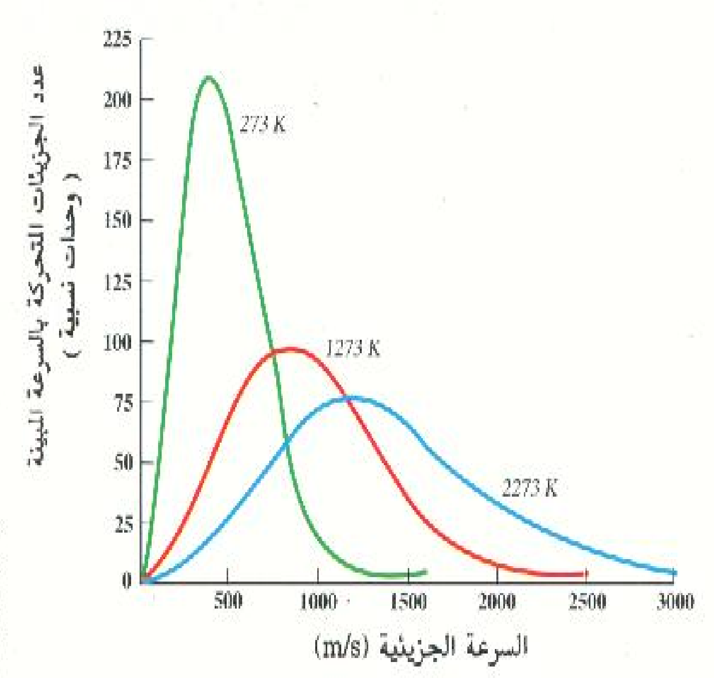
$$v_{rms} = \sqrt{3}\sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.732\sqrt{\frac{kT}{m}}$$



شكل 6-10 :
التوزيع الماكسويلي للسرعات في عينة من غاز O_2 عند 273 K . قيم السرعة الأكثر احتمالاً v_m والسرعة المتوسط $\bar{v}$ وجذر متوسط مربع السرعة v_{rms} موضحة على المنحنى .



توضح هذه الصورة للعدائين فى سباق الماراثون توزيعًا متميزًا للسرعات .



شكل 7–10 :
توزيع السرعات الجزيئية لغاز N_2 . تتحرك قمة منحنى التوزيع تجاه السرعات الأعلى ويزداد اتساع المنحنى بزيادة درجة حرارة الغاز .

وعليه فإذا علمت قيمة إحدى هذه السرعات يمكن إيجاد السرعتين الأخريين بسهولة .

يوضح الشكل 7–10 كيف يتغير توزيع السرعات فى عينة من غاز N_2 بتغير درجة الحرارة . ويبين هذا الشكل أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدى إلى تفلطح منحنى توزيع السرعات وإزاحة قمته v_m فى اتجاه القيم لأعلى . ويلاحظ أيضًا من شكل توزيع ماكسويل للسرعات أن هناك دائمًا عددًا قليلاً من الجزيئات التى تتحرك ببطئ شديد ، كما أن هناك دائمًا عددًا قليلاً منها يتحرك بسرعات أكبر كثيرًا من v_{rms} .

وتجدر الإشارة هنا إلى أن نظرية ماكسويل كانت موضع الكثير من الجدل حين إعلانها. ذلك أن الاختبار العملى لهذه النظرية كان يستلزم استعمال غرفة مفرغة منخفضة الضغط جدًا حتى يمكن قياس السرعات الجزيئية بدون التصادمات التى تغير اتجاهات السرعة باستمرار ، وهذا ما لم يتوفر فى ذلك الحين . ولكن بحلول 1926 استطاع الفيزيائى

الألمانى أوتوشتيرن إجراء تجربته الشهيرة التى أكدت تنبؤات ماكسويل النظرية عن توزيع السرعات الجزيئية . والواقع أن نظرية ماكسويل والتأكيد العملى لها يمثل خطوة هامة للغاية على الطريق فى مجال فهم الخواص الحرارية للمادة ، وهو ما سنتناوله بالمناقشة فى الفصول القليلة التالية :

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الاتزان الحرارى ، (ب) الترمومتر ، (جـ) مقياس سلزيوس . (د) مقياس فهرنهيت ،(هـ) الصفر المطلق ، (و) مقياس كلفن ، (ز) القانون الصفرى للديناميكا الحرارية ، (ح) عدد أفوجادرو ، (ط) المول والكيلو مول ، (ى) الكتلة الذرية والكتلة الجزيئية ، (ك) ثابت الغازات R ، (ل) ثابت بولتزمان k ، (م) الغاز المثالى ، (ن) قانون الغاز المثالى ، (س) نظرية الحركة للغازات ، (ع) جذر متوسط مربع السرعة .

2 ـ التعبير عن العلاقة بين مقاييس درجة الحرارة الثلاثة المشهورة فى صورة رسم تخطيطى مع توضيح موضع الصفر المطلق ونقطتى تجمد وغليان الماء على كل من المقاييس الثلاثة . تحويل درجات الحرارة بين هذه المقاييس .

3 ـ حساب كتلة الذرة الواحدة أو الجزئ الواحد من مادة بمعلومية الكتلة الذرية أو الكتلة الجزيئية M لهذه المادة .

4 ـ حساب عدد المولات أو الكيلو مولات فى عينة معلومة الكتلة عندما تكون الكتلة الذرية أو الجزيئية للمادة معلومة .

5 ـ استخدام قانون الغاز المثالى لإيجاد أى من الكميات الثلاث P ، V ، T بمعلومية الكميتين الأخريين .

6 ـ ذكر الشروط التى يجب توفرها ليكون غاز ما غازًا مثاليًا .

7 ـ حساب متوسط طاقة الحركة الانتقالية لذرات أو جزيئات غاز مثالى بمعلومية درجة حرارة الغاز .

8 ـ حساب جذر متوسط مربع سرعة ذرات أو جزيئات كتلة معلومة من غاز مثالى إذا أعطيت درجة حرارة الغاز والكتلة الذرية أو الجزيئية للغاز .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

عدد أفوجادرو : المول (N_A)

$$N_A = 6.02214 \times 10^{23} \text{ particles/mol}$$

ثابت الغازات (R) :

$$R = 8314 \text{ J/kmol.K}$$

ثابت بولتزمان (k) :

$$k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

مقاييس درجة الحرارة :

النقط المرجعية الآتية خاصة بالماء النقى عند ضغط محيط قدره 1 atm :

	°C	°F	K
نقطة الغليان	100	212	373.15
نقطة التجمد	0	32	273.15

خلاصة :

1 ـ الكلفن (K) هو الوحدة الأساسية لدرجة الحرارة فى النظام SI .

2 ـ الدرجة السيليزية تساوى الكلفن فى الحجم .

3 ـ الدرجة الفهرنهيتية تساوى 5/9 قدر الدرجة السيليزية .

4 ـ OK هو الصفر المطلق .

5 ـ العلاقة بين T_C و T_F هى $T_C = (T_F - 32)(5/9)$.

المول وعدد أفوجادرو :

عدد أفوجادرو N_A هو عدد الذرات فى 12 g من النظير ^{12}C بالضبط . المول الواحد هو أى مجموعة مكونة من N_A كيانًا . الكتلة الجزيئية (أو الذرية) من مادة هى كتلة مول واحد من جزيئات (أو ذرات) المادة .

قانون الغاز المثالى :

$$PV = nRT = NkT$$

خلاصة :

1 ـ يجب التعبير عن درجة الحرارة دائمًا بالكلفن حتى عند استخدام نسب هذه المعادلة لمقارنة الظروف المختلفة .

2 ـ فى قانون الغاز المثالى يمثل n عدد المولات أو الكيلو مولات ، بينما يمثل N عدد الجزيئات أو الذرات .

3 ـ يمكن التعبير عن ثابت الغاز بوحدات مختلفة متعددة . يجب أن نتأكد دائمًا أن وحدات V و P متسقة مع وحدات R .

4 ـ الضغط P هو الضغط الكلى وليس مدلول المقياس .

نظرية الحركة للغازات :

متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل ذرة أو جزئ فى غاز مثالى يرتبط بدرجة الحرارة طبقًا للمعادلة :

$$\overline{KE} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$$

جذر متوسط مربع سرعة الذرات أو الجزيئات هو :

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ قارن طاقة الجهد التثاقلى لجزئ نيتروجين يقع على ارتفاع قدره 1 m فوق سطح الأرض بطاقة حركته الانتقالية عندما تكون درجة الحرارة (أ) 0°C ، (ب) -270°C .

2 ـ بالرغم من أن الهواء يتكون أساسًا من جزيئات N_2 ، إلا أنه يحتوى على بعض O_2 بالطبع . هل يتحرك هذان النوعان من الجزيئات بنفس السرعة المتوسطة ؟ ما هى العلاقة بين هاتين السرعتين المتوسطتين بالضبط ؟

3 ـ لكى يهرب جسم من الأرض يجب أن يقذف هذا الجسم خارجها بسرعة لا يقل مقدارها عن 11,200 m/s . استخدم هذه الحقيقة وكذلك قيمة تقريبية للضغط الجوى فى تفسير وجود ذلك القدر الضئيل فقط من الهيدروجين فى الجو ، بالرغم من أن كميته فى الجو منذ بلايين السنين كانت أكبر من كمية النيتروجين فيه .

4 ـ ينص قانون بويل للغازات على أن حجم الغاز يتناسب عكسيًا مع ضغطه ، بشرط أن تكون كمية الغاز ودرجة حرارته ثابتتين . اثبت أن قانون بويل حالة خاصة من قانون الغاز المثالي .

5 ـ ينص قانون شارل على أن حجم الغاز يزداد طرديًا بزيادة درجة الحرارة ، بشرط أن يكون ضغط الغاز وكميته ثابتتين . أثبت أن هذا القانون حالة خاصة من قانون الغاز المثالي .

6 ـ ينص قانون دالتون للضغوط الجزيئية على أن الضغط الكلي لخليط من الغازات يساوي مجموع الضغوط الجزيئية للغازات في الخليط . اثبت صحة ذلك باستخدام قانون الغاز المثالي ونظرية الحركة .

7 ـ حبس خليط من غازي الهيدروجين والأكسجين عند الضغط الجوي في مخبار زجاجي قوي يحتوي على قطبين كهربائيين . أطلقت شرارة بين القطبين فسببت اشتعال الغازين وتفاعلهما طبقًا للمعادلة $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. هل سيتغير الضغط في الأنبوبة بعد أن تعود درجة الحرارة إلى قيمتها الأصلية (200°C) ؟ اشرح . ماذا يحدث إذا كانت درجة الحرارة الأصلية 200°C ودرجة الحرارة الابتدائية 20°C ؟

8 ـ بينما كان يوليوس قيصر يلفظ أنفاسه إثر إصابته القاتلة ، صاح وهو يمسك بيد صديقه « حتى أنت يا بروتس » ، ومع هذه الجملة خرجت في هواء زفيره كمية من غاز النيتروجين . قدر عدد هذه الجزيئات التاريخية التي تستنشقها مع كل نفس من أنفاسك إذا علمت أن جو الأرض يحتوي على 10^{19} kg من الغاز .

9 ـ كم ستكون قراءة بارومتر زئبقي في سفينة فضائية تدور حول الأرض إذا كان ضغط الهواء في السفينة 75 cmHg .

مسائل

القسم 10-1

1 ـ حول ما يأتي إلى مقياسي درجة الحرارة الآخرين : (أ) 74°F ، (ب) -28°C ، (جـ) 280 k .

2 ـ حول ما يأتي إلى مقياسي درجة الحرارة الآخرين : (أ) 72°C ، (ب) -22°F ، (جـ) 230 k .

3 ـ نقطة غليان الهيدروجين السائل 252.87°C . عبر عن درجة الحرارة هذه بالدرجات الفهرنهيتية والكلفن .

4 ـ في يوم معين كان الفرق بين درجتي الحرارة العظمى والصغرى 62°F . احسب قيمة هذا الفرق بالدرجات السيليزية والكلفينية .

5 ـ مادة نقطة غليانها 486.60°C ونقطة انصهارها تقل بمقدار 528.4°F عن نقطة الغليان . (أ) ما هي نقطة الانصهار بالدرجات السيليزية ؟ (ب) عين نقطتي الغليان والانصهار بالدرجات الفهرنهيتية .

6 ـ إذا تغيرت درجة حرارة مادة بمقدار ΔT_C على مقياس سلزيوس ، إثبت أن التغير المناظر على مقياس فهرنهيت هو $\Delta T_F = \frac{9}{5}\Delta T_C$.

7 ـ يعتقد أن أعلى درجة حرارة تم تسجيلها على سطح الأرض على الإطلاق كانت في ليبيا عام 1922 ، وكانت تساوي 136°F . أما أدنى درجة حرارة وهي -128.56°F فقد سجلت عام 1983 في محطة فوستوك بالقارة المتجمدة الجنوبية . حول درجتي الحرارة هاتين إلى الدرجات السيليزية والكلفن .

8 ـ عند أي درجة حرارة تتساوى القيمة العددية على مقياس فهرنهيت وسلزيوس ؟

9 ـ ما مقدار درجة حرارة جسم التي تكون واحدة على مقياس فهرنهيت وكلفن ؟

10 ـ درجة حرارة جسم إنسان في حالة صحية جيدة هي 98.6°F . عبر عن درجة الحرارة هذه بالدرجات السيليزية والكلفن .

القسم 10-2

11 ـ ما هي كتلة الذرة الواحدة من (أ) الذهب ؟ (ب) الفضة ؟ (جـ) الحديد ؟

12 ـ الصيغة الكيميائية لغاز النشادر هي NH_3 . ما كتلة جزئ واحد من غاز النشادر ؟

13 ـ الصيغة الكيميائية للبنزين هي C_6H_6 . ما عدد جزيئات البنزين في عينة كتلتها 50 g ؟

14 ـ ما عدد الذرات الموجودة في قالب كتلته 20 g من النحاس النقي ؟

15 ـ يحتوى كأس على كتلة قدرها 80 g من الماء . ما عدد جزيئات الماء في الكأس ؟ الصيغة الكيميائية للماء هي H_2O .

16 ـ الكتلة الجزيئية للنيلون هي 10,000 kg/kmol ، وكثافته تساوى 1100 kg/m³ ، (أ) أوجد كتلة جزئ النيلون . (ب) ما عدد جزيئات النيلون في كتلة قدرها 1 kg ؟ (جـ) ما عدد الجزيئات في حجم قدره 1 m³ من النيلون ؟

17 ـ كثافة الكحول الإيثيلي (C_2H_5OH) تساوى 790 kg/m³ تقريبًا . أوجد (أ) كتلة جزئ من الكحول الإيثيلي ، (ب) عدد الجزيئات في 1 liter من الكحول الإيثيلي .

18 ـ اعتبر أن رجلاً كتلته 60 kg يمثل جزيئًا ضخمًا . ما هي كتلته الجزيئية ؟

القسمان 3-10 و 4-10

19 ـ خزان حجمه 1 liter يحتوى على غاز الأكسجين O_2 عند درجة 22°C . فإذا كان مدلول ضغط المقياس 2.2×10^6 Pa ، فما كتلة الأكسجين في الخزان ؟

20 ـ يحتوى خزان حجمه 2 liter على غاز الهليوم He عند درجة حرارة قدرها 33°C وضغط قدره 1200 kPa . ما كتلة الهليوم الموجود بالخزان ؟

■ 21 ـ قدر الكتلة الكلية للهواء في غرفة غير مدفئة حجمها 6 m × 8 m × 10 m في يوم من أيام الشتاء درجة حرارته 20°F . اعتبر أن متوسط الكتلة الجزيئية للهواء 28.8 kg/kmol . ما هي كمية الهواء التي تدخل الغرفة أو تخرج منها إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 75°F . افترض أن الضغط في الغرفة يساوى الضغط الجوى .

22 ـ ملأت أنبوبة اختبار بغاز مثالى عند درجة حرارة قدرها 27°C حينما كان مدلول ضغط المقياس فيها 180 kPa ثم أغلقت بإحكام . ماذا سيكون مدلول ضغط المقياس في الأنبوبة عند تسخينها إلى 384°C .

■ 23 ـ ملأت قارورة حجمها نصف لتر بغاز مجهول فازدادت كتلتها بمقدار 568 mg عن كتلتها وهي مفرغة . فإذا كان ضغط الغاز 80 kPa ودرجة حرارته 23°C ، فما هي الكتلة الجزيئية للغاز ؟

24 ـ تحتوى أنبوبة اختبار مغلقة بإحكام على كمية من غاز النيتروجين N_2 عند درجة حرارة قدرها 27°C ومدلول ضغط المقياس فيها 240 kPa . ما قيمة مدلول ضغط المقياس للغاز عند تبريده إلى درجة حرارة قدرها −88°C ؟

25 ـ ما حجم كمية من الهواء ضغطها الابتدائى 100 kPa اللازمة لملأ إطار سيارة حجمه V_0 حتى يصل مدلول ضغط المقياس فيه إلى 160 kPa ؟

■ 26 ـ تحررت فقاعة هوائية من غواصة في قاع بحيرة فتضاعف حجمها ثلاث مرات أثناء صعودها إلى سطح البحيرة . قدر عمق البحيرة بفرض أن درجة حرارة البحيرة والهواء لا تتغير أثناء صعود الفقاعة إلى السطح .

27 ـ خزان حجمه 1 liter يحتوى على غاز الأكسجين عند مدلول ضغط مقياس قدره 840 kPa . ما الحجم الذى يشغله الغاز عند تمدده حتى يصل ضغطه إلى الضغط الجوى 100 kPa ؟ افترض أن درجة حرارة الغاز ثابتة .

28 ـ ضغط غاز عند درجة حرارة الغرفة (27°C) والضغط الجوى 100 kPa حتى وصل حجمه إلى عشر قيمته الأصلية وزاد ضغطه المطلق إلى 2500 kPa . ما هي درجة الحرارة الجديدة للغاز ؟

29 ـ ضغطت كمية معينة من غاز في خزان عند درجة حرارة قدرها 27°C إلى أن تضاعف ضغطها ثلاث مرات وقل حجمها إلى النصف . أوجد نسبة درجة الحرارة الابتدائية للغاز إلى درجة حرارته النهائية .

- 30 ـ خزان يحتوى على 1 mol من غاز الأكسجين عند ضغط مطلق قدره 500 kPa ودرجة حرارة قدرها 27°C . (أ) إذا سخن الغاز عند ثبوت الحجم حتى أصبح ضغطه أربعة أضعاف الضغط الابتدائى ، فما هى درجة الحرارة الجديدة للغاز ؟ (ب) إذا سخن الغاز بحيث تضاعف كل من حجمه وضغطه مرتين ، فما هى درجة الحرارة الجديدة للغاز ؟
- 31 ـ فى محرك الديزل يضغط الكباس الهواء عند درجة حرارة قدرها 30°C من ضغط مساو للضغط الجوى تقريبًا إلى ضغط قدره حوالى 5400 kPa وحجم يساوى 1/15 من حجمه الأصلى . ما هى درجة الحرارة النهائية للهواء المضغوط ؟
- 32 ـ يؤدى التمدد الفجائى للغازات إلى تبريدها . وفى عملية تبريد من هذا النوع تمدد غاز درجة حرارته 27°C من ضغط قدره 4000 kPa إلى الضغط الجوى فأصبح حجمه 36 ضعفًا قدر حجمه الابتدائى . ما هى درجة الحرارة النهائية للغاز المبرد ؟
- 33 ـ تمدد غاز عند درجة حرارة قدرها 27°C وضغط مطلق قدره 1000 kPa تمددًا فجائيًا فى غرفة حجمها 12 مرة قدر حجم الغاز . فإذا كانت درجة حرارته الجديدة $-10°C$ ، فما هو الضغط النهائى للغاز ؟
- 34 ـ أخرجت سمكة على عمق 10 m فى الماء العذب هواء الزفير على هيئة فقاعة حجمها V_0 . أوجد حجم الفقاعة قبل أن تصل إلى السطح مباشرة . افترض أن درجة حرارة الفقاعة تظل ثابتة أثناء الصعود .
- 35 ـ قلبت أنبوبة اختبار أسطوانية طولها 16 cm ثم دفعت بطرفها المفتوح رأسيًا إلى أسفل فى الماء . ما مقدار ارتفاع الماء داخل الأنبوبة عندما يصبح طرفها المغلق عند سطح الماء ؟ افترض أن ضغط الهواء عند سطح الماء (وفى الأنبوبة قبل غمرها) يساوى 1 atm . افترض أيضًا أن درجة حرارة الهواء داخل الأنبوبة تظل ثابتة أثناء غمرها .
- 36 ـ يصمم بالون الأرصاد الجوية بحيث يتمدد إلى أقصى نصف قطر له وقدره 24 m (باعتباره كرة مجوفة) عندما يطير على ارتفاع يكون الضغط فيه 3 kPa فقط وتكون درجة الحرارة فيه $-73°C$. إذا كان البالون مملوءًا بالهليوم عند الضغط الجوى ودرجة حرارة قدرها 27°C ، ما حجم البالون لحظة إطلاقه ؟

37 ـ تحول 1 liter من الماء السائل إلى بخار عند الضغط الجوى ودرجة حرارة قدرها 100°C . ما حجم بخار الماء الناتج ؟

38 ـ استخدم قانون الغاز المثالى وتعريف المول بدلالة كتلة الغاز فى إيجاد كثافة غاز ؟

39 ـ عين كثافة غاز الأكسجين O_2 عند درجة الحرارة والضغط القياسيين باستعمال قانون الغاز المثالى .

القسمان 5-10 و 6-10

40 ـ تقدر درجة الحرارة فى باطن الشمس بحوالى 14×10^6 K ، ومن المعلوم أن البروتونات ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) تكون الجزء الأعظم من كتلة الشمس . بفرض أن البروتونات فى باطن الشمس تسلك سلوك غاز مثالى ، أوجد القيمة التقريبية لجذر متوسط مربع سرعة البروتون .

41 ـ ما هى درجة الحرارة التى تتساوى عندها السرعة rms لجزيئات النيتروجين بالسرعة rms للهليوم عند 27°C ؟

42 ـ عند أى درجة حرارة تصبح السرعة rms لجزيئات غاز مثالى ثمانية أضعاف السرعة rms لنفس الجزيئات عند 0°C ؟

43 ـ ما متوسط طاقة حركة جزيئات الأكسجين عند درجة الغرفة (27°C) ؟

44 ـ سرعة هروب القذوف فوق سطح من الأرض حوالى 11.2 km/s . (أ) عند أى درجة حرارة تتساوى السرعة rms لجزيئات الهيدروجين مع هذه السرعة ؟ (ب) كرر المسألة بالنسبة لجزيئات النيتروجين N_2 والأكسجين O_2 .

45 ـ سرعة الهروب من فوق سطح القمر حوالى 2.37 km/s . عند أى درجة حرارة تكون السرعة rms لجزيئات الهليوم مساوية لهذه السرعة ؟

46 ـ درجة الحرارة فى الفضاء الخارجى حوالى 3 K . وقد أثبتت الدراسات أن الفضاء الخارجى يتكون أساسًا من ذرات الأيدروجين المنفردة بمعدل ذرة واحدة لكل سنتيمتر مكعب من الحجم . (أ) أوجد ضغط غاز الأيدروجين الذرى فى

الفضاء الخارجي ؛ وعبر عن الإجابة بالضغط الجوى (atm) . (ب) أوجد متوسط طاقة الذرة الواحدة من الهيدروجين فى هذا الغاز . (جـ) ما سرعة الذرة الواحدة ؟

47 ـ إثبت أن ضغط الغاز المثالى يمكن كتابته على الصورة $P = \rho\overline{v^2} / 3$.

■ 48 ـ أوجد كثافة بخار الماء عند 1 atm و 100°C باعتباره غازًا مثاليًا . قارن نتيجة حساباتك بالكثافة الفعلية للبخار وهى 0.598 kg/m3 . برر أى فرق قد تلاحظه .

49 ـ إذا كانت السرعة rms لغاز عند درجة الحرارة 27°C تساوى 80 m/s ، فما كتلة الجزئ الواحد من هذا الغاز ؟ هل هذا مثال لجزئ من غاز واقعى ؟

■ 50 ـ تتحرك حزمة من الجسيمات كتلة كل منها m_0 وسرعته v على استقامة المحور x . وتضرب جسيمات هذه الحزمة مساحة قدرها 1 mm² بمعدل 1×10^{16} جسيمًا فى الثانية . أوجد ضغط الحزمة الجسيمية على هذه المساحة إذا كانت الجسيمات تلتصق بها عند التصادم . كرر الحل بالنسبة لحزمة إلكترونية فى أنبوبة التليفزيون حيث $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg و $v = 8 \times 10^{7}$ m/s .

■ 51 ـ إناء مكعب الشكل حجمه 2.5 liter ويحتوى على خليط من غازى الهليوم He والهيدروجين H_2 فى حالة اتزان عند درجة الحرارة 120°C . (أ) ما متوسط طاقة حركة كل نوع من الجزيئات ؟ (ب) ما قيمة السرعة rms لهذين الجزيئين ؟ (جـ) إذا كان الإناء يحتوى على 1 mol من الهليوم و 2 mol من الهيدروجين ، فما هو الضغط الكلى داخل الإناء ؟

مسائل إضافية

■ 52 ـ إناء مغلق مكعب الشكل طول ضلعه 24 cm يحتوى على ضعف عدد أفوجادرو من الجزيئات عند درجة حرارة قدرها 27°C . ما مقدار القوة التى يؤثر بها الغاز على أحد جدران الإناء ؟

■ 53 ـ وضعت أسطوانة دائرية قائمة ذات قاعدة واحدة ارتفاعها 36.00 cm ومساحة قاعدتها 10.0 cm² على منضدة عند الضغط ودرجة الحرارة القياسيين بحيث كان طرفها المفتوح إلى أعلى . بعدئذ وضع كباس سدود للغاز (يغلق الأسطوانة بإحكام دون احتكاك) كتلته 4.8 kg فى الأسطوانة وسمح له بالسقوط إلى ارتفاع يتحقق عنده اتزانه . ما قيمة الضغط داخل الأسطوانة وارتفاع الكباس فى حالة الاتزان ؟ افترض أن درجة الحرارة النهائية 0°C .

■ 54 ـ وضعت أنبوبة زجاجية ضيقة طولها 1 m ومغلقة فى أحد طرفيها فى وضع أفقى . بعدئذ وضعت قطرة كبيرة تكفى لغلق الأنبوبة فى المنتصف تمامًا عند درجة حرارة قدرها 27°C ثم غمر الطرف المغلق للأنبوبة فى ماء يغلى (درجة حرارته 100°C) . أين سيكون الوضع الجديد لقطرة الزئبق فى الأنبوبة ؟

■ 55 ـ أنبوبة شعرية رأسية يملأ جزءها السفلى عمود من الزئبق ارتفاعه 6 cm . أغلق الطرف العلوى للأنبوبة بإحكام (عند الضغط الجوى) عند نقطة ترتفع عن السطح العلوى للزئبق مسافة قدرها 20 cm . إذا قلبت الأنبوبة رأسًا على عقب ، فما طول عمود الهواء فى الجزء السفلى للأنبوبة ؟

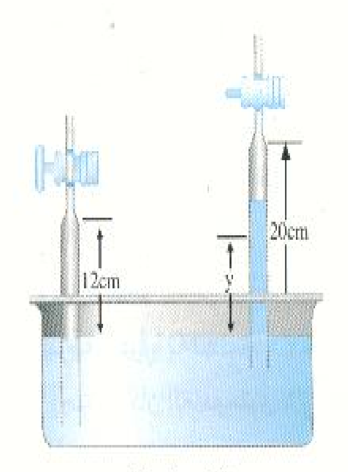
■■ 56 ـ وضعت قطعة من الثلج الجاف (CO_2) فى أنبوبة اختبار ثم سدت فوهتها باللحام . إذا كانت كتلة الثلج الجاف 0.4 g وكان حجم الأنبوبة بعد لحامها 22 cm³ ، فما هو الضغط الكلى لغاز CO_2 فى الأنبوبة بعد أن يتم تبخر الثلج الجاف ويصل الغاز إلى حالة اتزان حرارى مع الوسط المحيط عند درجة حرارة قدرها 27°C ؟

■ 57 ـ عندما سدت أنبوبة اختبار حجمها 24 cm³ بإحكام عند درجة حرارة منخفضة جدًا تكثفت بضعة قطرات من النيتروجين السائل فى الأنبوبة من الهواء الذى كان فيها (نقطة غليان النيتروجين -210°C) . ماذا سيكون ضغط النيتروجين فى الأنبوبة عند تسخينها إلى درجة 27°C إذا كانت كتلة القطرات 0.08 g ؟

■■ 58 ـ يمثل الشكل م1-10 كباسًا لا احتكاكيًا مساحته A وكتلتـه M يفصـل بـين حجمين متساويين V_0 من غاز مثالي ضغطه P_0 . قلبت الأسطوانة الآن لتسـتقر على إحدى القاعدتين . أوجد الحجم العلوى عند الاتزان بدلالة P_0 و V_0 .

شكل م1-10

■■ 59 ـ ملأ بالون كروى الشكل $(V = 5\ m^3)$ بغاز الـهليوم $(M = 4.0\ kg/kmol)$ فى يوم كان الضغط فيـه 1 atm ودرجـة الحـرارة فيـه 0°C . (أ) مـا عـدد الكيلو جرامات من الـهليوم فى البالون إذا كان البالون يطفو فى الـهواء ؟ إهمل كتلة البالون . (ب) ما ضغط الـهليوم فى البالون ؟

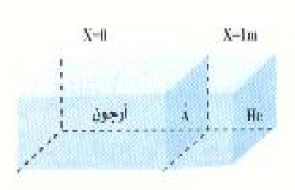


شكل م2-10

■■ 60 ـ وضعت فتحة أنبوبة منتظمة المقطع ذات محبس مفتوح كما بالشكل م2-10 فى الزئبق ثم خفضت فيه رأسيًا بحيث تبقى بالأنبوبة طول قدره 12 cm دون أن يمتلأ بالزئبق . وبعد إغلاق المحبس رفعت الأنبوبة رأسيًا إلى أعلى مسافة قدرها 8 cm . ما هو ارتفاع الزئبق y فى الأنبوبة ؟ اعتبر أن الضغـط ودرجـة الحرارة هما القيمتان القياستان .

■■ 61 ـ عندما ارتفعت درجة الحرارة من 27°C إلى 750 K عند ضغط قدره 1 atm لوحظ أن وعاء يحتوى على الـهواء يتمدد مـن 22 liters إلى 53.6 liters . هل هناك أى تسـرب للـهواء من الوعاء ؟ وإذا كان هناك تسرب بالفعل ، فما هى كمية الـهواء المتسربة من أو إلى الوعاء فى هذه العملية ؟

■■ 62 ـ افترض أن لديك صندوقًا معزولاً طوله 1 m ومساحة مقطعه A ، وأن الصندوق مقسوم إلى قسمين بواسطة فاصل معـزول سدود للغاز كما هو مبين بالشكل م3-10 . فإذا كان القسم الأيسر يحتوى على 105 g من غـاز الأرجـون عنـد 300 K ، وكان القسم الأيسر يحتوى على 15 g غاز الـهليوم عند 260 K . أين سيكون موضع الكباس القابل للحركة اللااحتكاكية . بفرض أن درجتى الحرارة تظلان ثابتتين .



شكل م3-10

■■ 63 ـ يتكون جو كوكب الزهرة كله تقريبًا (96 %) من CO_2 ، ودرجة حرارة سطحه 750 K تقريبًا وضغطـه حـوالى 90 مـرة قدر الضغط الجوى على الأرض . أوجد كثافة CO_2 والسرعة rms لجزيئات CO_2 على سطح الزهرة .

■■ 64 ـ استخدمت أنبوبة صغيرة فى توصيل إناء حجمه 2.0 liters يحتوى على غاز مثالى ضغطه 240 kPa ودرجة حرارته 20°C بإناء آخر حجمه 8 liters يحتوى علـى نفس الغاز عند درجة حرارة قدرها 27°C وضغط قـدره 100 kPa ، وبعد وصول الغاز إلى حالة الاتزان أصبحت درجة حرارته 23°C . ما هو الضغط النهائى للغاز ؟



عند مناقشة تأثير الحرارة على الغازات فى الفصل السابق تعاملنا مع ذرات وجزيئات الغاز باعتبارها كرات مصمتة مرنة تنطلق كالسهام هنا وهناك ، كما أهملنا حقيقة أن الذرات والجزيئات لها تركيب داخلى ، وأن طاقتها يمكن أن تتضمن أنواعًا أخرى من الطاقة خلاف طاقة الحركة الانتقالية . وباستخدام مثل هذا التبسيط للأمور تمكن الباحثون الأوائل من تحقيق اتفاق جيد بين النظرية والتجربة فى حالة كثير من الغازات . ولكن فى حالة السوائل والجوامد تؤدى تعقيدات كثيرة أخرى إلى تأثير واضح محسوس على سلوك الذرات والجزيئات . ومن ثم يمكن القول أن الفروض المستخدمة فى وصف الغازات المثالية غير مناسبة أو ملائمة لتفسير النتائج العملية تفسيرًا صحيحًا . لنحاول الآن مناقشة كيفية وصف الخواص الحرارية لهذه الأنظمة الأكثر تعقيدًا .

11-1 مفهوم الحرارة

يعلم الإنسان منذ زمن طويل أنه من الممكن استخدام الأجسام الساخنة لتسخين الأجسام الباردة . ولكن فهم العمليات المتعلقة بهذا الموضوع فهمًا حقيقيًا لم يتحقق بالفعل إلا فى منتصف القرن العشرين . وليس من الغريب أن فهمنا لطبيعة الحرارة قد تطور بصورة سريعة مع ظهور نظرية الحركة للغازات . وقد رأينا فى الفصل السابق أن نظرية الحركة تؤدى مباشرة إلى معنى فيزيائى محدد لدرجة الحرارة ، ذلك أن درجة الحرارة المطلقة T لغاز تتناسب طرديًا مع متوسط طاقة الحركة الانتقالية للجزئ فى الغاز . وقد استنتجنا

كذلك أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزئ فى الغاز كتلتـه m_0 يمكن إيجادهـا من العلاقة :

$$\left(\frac{1}{2}m_0v^2\right)_{av} = \frac{3}{2}kT \qquad (4-10)$$

حيث $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K هو ثابت بولتزمان .

لنفرض الآن أننا قد سمحنا لغازين فى إنائين درجتا حرارتـهما الأصليتان T_1 و T_2 $(T_1 > T_2)$ بالاختلاط أحدهما مع الآخر ، كما هو مبين بالشكل 1-11 . تبين التجربة أن درجة حرارة الخليط تتغير مع الزمن ، ولكن بعد مرور زمن معين سوف تصل درجة حرارة الخليط إلى قيمة نهائية T تقع بين T_1 و T_2 . ويمكن تفسير هـذا السلوك بدلالة متوسط طاقة حركة الجزيئات طبقًا لنظرية الحركة كالتالى . بعد اختلاط الغازين تتصادم جزيئات الغاز 1 ذات الطاقة العالية بجزيئات الغاز 2 ذات الطاقة المنخفضة . وفى هذه التصادمات تفقد الجزيئات عالية الطاقة بعض طاقتها (مع انخفاض درجة حرارتها) وتكتسب الجزيئات منخفضة الطاقة تلك الطاقة (وبذلك ترتفع درجة حرارتها) . ويستمر هذا التبادل فى الطاقة بين الغازين حتى يتساوى متوسط طاقة حركتـهما ويصل الخليط إلى حالة تثبت فيها درجة الحرارة عند T حيث $T_1 > T > T_2$ ، وفى هذه الحالـة لن تسبب التصادمات بين جزيئات الغازين أى فقد أو كسب فى متوسط طاقة الحركة . هذا أيضًا هو نفس ما يحدث عند تلامس السوائل أو الجوامد المختلفة فى درجة الحرارة .

شكل 1-11: عندما يتلامس الغازان أحدهما مع الآخـر ، تسبب التصادمات بين الجزيئات ذات الطاقة العالية (ودرجة حرارتها T_1) والجزيئـات ذات الطاقة المنخفضة (ودرجة حرارتها T_2) تغير متوسط طاقة الحركـة الجزيئيـة فـى الأسطوانتين باستمرار إلى أن تثبت درجة الحرارة .

بناء على ذلك وغيره من الاعتبارات الأخرى يستنتج أنه إذا تلامس جسمان مختلفين فى درجة الحرارة فإن الطاقة تنتقل ، أو **تسرى** ، من الجسم الأسـخن إلى الجسم الأبـرد . **هذه الطاقة المتبادلة فى مثل هذا الموقف هى ما يعرف بالحرارة .**

الطاقـة الحراريـة هـى الطاقـة التـى تنتقـل مـن جسـم سـاخن إلى جسم بـارد نتيجـة للاختلاف بين درجتى حرارة الجسمين .

ويترتب على ذلك أنه :

إذا تساوت درجتا حرارة الجسمين المتلامسين فلن يحدث بينهما أى تبادل للطاقة .

هذه الحالة التى لا يحدث فيها تبادل للطاقة بين جسمين متساويين فى درجة الحرارة هى ما يعرف باسم **الاتزان الحرارى** . ويعتبر مفهوم الاتزان الحرارى أساس ما يسمى **بالقانون الصفرى للديناميكا الحرارية .**

إذا وجد جسمان كل على حدة فى حالة اتزان حرارى مع جسم ثالث فإنهما يكونان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآخر .

قد تبدو هذه العبارة واضحة* ، ولكنها الأساس الفيزيائى الذى يمكننا من قياس درجة

* الواقع أن هذه العبارة كـانت مـن البديـهيات المسلم بـها إلى أن اكتشـف القـانون الأول للديناميكا الحرارية ، وهنا أصبحت الحاجة ملحة لوضع تعريف صريح لدرجة الحرارة على أساس الاتزان الحـرارى . لذلك سمى هذا التعريف بالقانون « الصفرى » على أن يفهم ضمنيًا أنه القانون الأول .

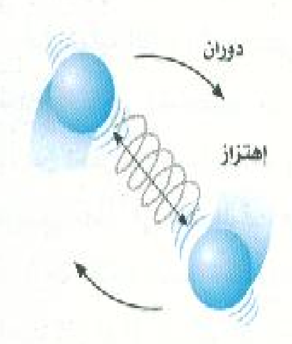
الحرارة باستخدام الترمومترات . فإذا وصل ترمومتر (الجسم الثالث) إلى حالة اتزان حرارى مع جسمين وكانت قراءته واحدة فى الحالتين فإننا نستنتج أن الجسمين متساويان فى درجة الحرارة بدون أن نحتاج إلى وضعهما فى حالة تلامس .

11-2 الطاقة الحرارية

لندرس الآن ما يحدث عند انتقال الطاقة إلى المادة ، ولتكن بدايتنا بغاز أحادى الذرة كالهليوم . يمكننا كتقريب أول اعتبار أن كل ذرة من الغاز تتصرف كما لو كانت كرة صلدة تنطلق كالسهم هنا وهناك . ورغم أن هذه الذرة لها طاقة حركة دورانية نتيجة لحركتها المغزلية حول محورها ، فإن هذه الطاقة $\left(\frac{1}{2}I\omega^2\right)$ صغيرة جدًا لأن عزم القصور الذاتى للذرة صغير جدًا جدًا . ومن ثم يمكن إهمال طاقة الحركة الدورانية بالنسبة إلى طاقة الحركة الانتقالية . يمكننا القول إذن أن الطاقة الكلية للجزئ أحادى الذرة تساوى طاقة حركتها الانتقالية فقط .

أما فى حالة الجزيئات ثنائية الذرة ، كجزيئات الأكسجين O_2 والنيتروجين N_2 ، فإن عزم القصور الذاتى يكون كبيرًا ، وذلك لوجود مسافة فاصلة بين الذرتين المكونتين للجزئ . ونتيجة لذلك ستكون طاقة حركتها الدورانية مقارنة بطاقة حركتها الانتقالية ولا يمكن إهمالها .

إضافة إلى طاقتى الحركة الانتقالية والدورانية فإن الجزيئات ثنائية الذرة تمتلك نوعًا ثالثًا من الطاقة هو الطاقة الاهتزازية . فنظرًا لوجود الرابطة الكيميائية بين ذرتى الجزئ ، والممثلة بالزنبرك فى الشكل 2-11 ، يمكن لهاتين الذرتين أن تتذبذبا على استقامة الخط الواصل بينهما بطريقة تشبه كثيرًا تذبذب كتلتين مثبتتين فى طرفى زنبرك مرن . وتتكون الطاقة الاهتزازية للجزئ ، أو لأى نظام متذبذب عمومًا ، من طاقة الحركة المرتبطة بحركة الذرتين وطاقة الجهد المرتبطة باستطالة أو انضغاط الرابطة . يمكننا أن نستنتج بناء على ذلك أن الطاقة المضافة إلى غاز ثنائى الذرة لن تظهر كلها فى صورة طاقة حركة انتقالية للجزيئات كما فى حالة الجزئ أحادى الذرة ، بل إن جزءًا منها سوف يتحول إلى صور أخرى من الطاقة الداخلية (أى إلى طاقة دورانية واهتزازية) .



شكل 2-11:
جزئ الغاز ثنائى الذرة له طاقة حركة انتقالية وطاقة حركة دورانية ، كما أن له طاقة حركة اهتزازية مرتبطة بالرابطة شبه الزنبركية بين ذرتيه .

ويصبح الموقف أكثر صعوبة عندما ننتقل إلى الغازات عديدة الذرات ، والتى تكون جزيئاتها أكثر تعقيدًا من الجزيئات ثنائية الذرة . ففى هذه الحالة يمكن للجزيئات أن تتذبذب أو تدور بعدة طرق مختلفة ، قد تكون كثيرة فى بعض الأحيان ؛ ولهذا يكون نصيب طاقة الحركة الانتقالية من الطاقة المضافة إلى المادة أقل مما فى الحالتين السابقتين . ويمكننا أن نستنتج بناء على ذلك أنه كلما كانت جزيئات الغاز أكثر تعقيدًا ، كلما زادت كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز بمقدار معين ؛ وسوف تكون هذه العلاقة بين الحرارة المضافة والارتفاع الناتج فى درجة الحرارة موضوع القسم 4-11 .

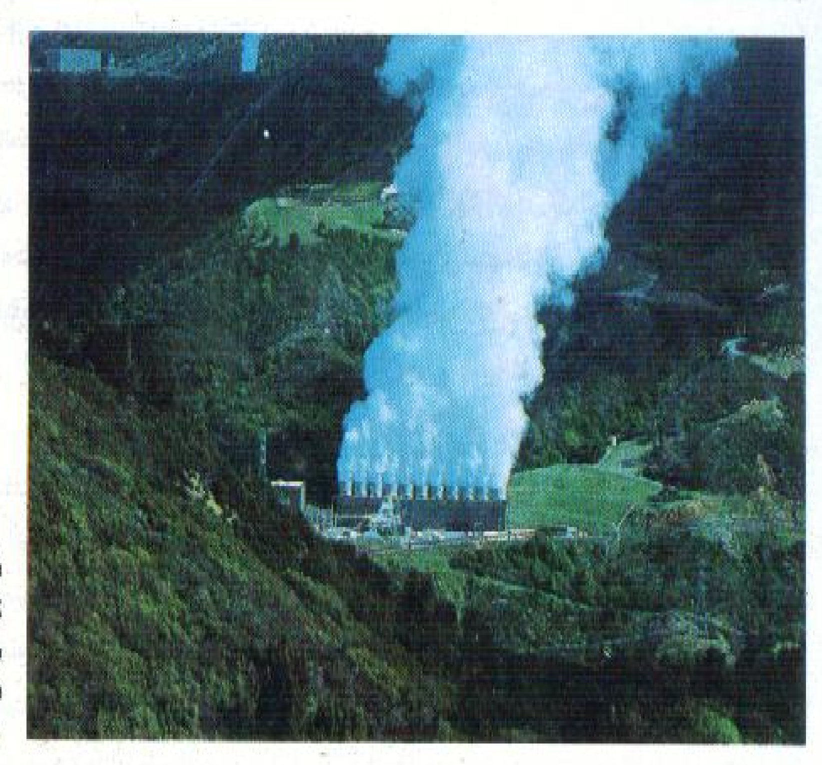
ويتعقد الموقف تمامًا فى حالة السوائل والجوامد . فبالإضافة إلى الروابط الكيميائية الموجودة داخل الجزيئات ذاتها ، هناك روابط بين الجزيئات المتجاورة . ومن ثم فإن الحرارة المضافة يمكن أن تؤدى إلى أنواع عديدة من الحركة داخل حجم المادة . وفى جميع الحالات تتغير هذه الحركات بصورة مستمرة نتيجة للتصادمات العشوائية للذرات المتحركة ولن يكون لها اتجاه ثابت . هذه الحركات العشوائية تسمى **بالحركات الحرارية** ؛ كما تعرف الطاقة المرتبطة بهذه الحركات العشوائية **بالطاقة الحرارية** ، وهو ما أشرنا إليه فى الفصل الخامس عند مناقشة تأثير القوى الاحتكاكية .

هناك فرق هام بين **الحرارة والطاقة الحرارية** . فالحرارة هى الطاقة التى تنساب من جسم إلى آخر نتيجة لاختلاف درجتى حرارتهما . أما الطاقة الحرارية فهى الطاقة التى تحتويها المادة بفضل الحركات العشوائية لذراتها وجزيئاتها . وعندما تضاف الحرارة إلى مادة ما قد يستهلك جزء منها فى بذل شغل ميكانيكى ، كما فى حالة حركة كباس نتيجة للتمدد الحرارى لغاز مثلاً . وعليه فليس من المحتم أن تتحول كل الحرارة المضافة إلى طاقة حرارية .

الطاقة الحرارية هى الطاقة المرتبطة بالحركة العشوائية للذرات والجزيئات .

ومن الجدير بالملاحظة أن الحرارة المنتقلة إلى المادة تتحول فى أغلب الأحيان إلى طاقة حرارية ، ولكن هناك احتمالات أخرى سوف نناقشها فيما بعد . كذلك يمكن أن تزداد الطاقة الحرارية للمادة بطرق ميكانيكية أو بإضافة الحرارة إليها على السواء .

قبل نهاية القرن الثامن عشر كانت دراسة الحرارة منفصلة تمامًا عن دراسة الميكانيكا . وفى الثمانينيات من ذلك القرن كان الفيزيائى الأمريكى بنيامين طومسون أول من تحقق من وجود علاقة وثيقة بين الشغل الميكانيكى وتولد الحرارة . كان طومسون يعمل فى ذلك الوقت فى مجال حفر مواسير المدافع فى بافاريا ، ولاحظ أن درجة حرارة الماسورة ترتفع بشكل ملحوظ أثناء عمل آلة الحفر . وقبل ذلك الوقت كان الرأى السائد عن الحرارة أنها عبارة عن مائع يسمى **الكالوريك** ، أو السيال الحرارى ؛ وأن الأجسام الساخنة تحتوى على الكالوريك بعكس الأجسام الباردة التى لا تحتوى عليه . فإذا تلامس جسم ساخن بآخر بارد ، سوف ينساب الكالوريك من الجسم الساخن إلى البارد ويستمر ذلك إلى أن تتساوى درجتا حرارتهما . ولكن مشاهدات طومسون أثبتت أن الحرارة يمكن أن **تتولد** بواسطة قوى الاحتكاك الميكانيكى . وبحلول منتصف القرن التاسع عشر أثبتت تجارب الفيزيائى الإنجليزى جيمس برسكوت جول وجود تكافؤ دقيق بين الوحدات الميكانيكية للطاقة والوحدات الحرارية للحرارة .



فى بعض المواقع ، كهذا الموقع فى كاليفورنيا ، تكون الطاقة الحرارية فى باطن الأرض (الطاقة الجيوحرارية) قريبة جدًا من سطح الأرض بحيث يمكن استخدامها فى توليد الكهرباء .

يعلم الكشافون جميعًا أنه يمكن إشعال النار بحك قطعتين من الخشب الجاف سويًا بشدة . ما يحدث فى هذه الحالة هو أن الاحتكاك الميكانيكى يسبب تحرك الجزيئات على سطحى قطعتى الخشب حركة عشوائية عنيفة . وهذه تكون الطاقة الحرارية الإضافية . ويمكن القول عمومًا أن فواقد الطاقة الميكانيكية المرتبطة بالاحتكاك تظهر على هيئة حرارة . هذا ويؤكد لنا قانون بقاء الطاقة أن الطاقة الميكانيكية المفقودة تؤدى إلى زيادة الطاقة الحرارية بنفس المقدار .



تعتبر الشهب ، أو ما يسمى أحيانًا بالنيازك ، أمثلة درامية لتحول طاقة الحركة إلى طاقة حرارية . فعندما تدخل هذه القطع الصغيرة من المادة الغلاف الجوى للأرض يتسبب احتكاكها مع الهواء فى تسخينها وتبخرها .

خلافات في الفيزياء : طبيعة الحرارة

يعتبر الإحساس بالحرارة والبرودة واحدًا من أهم الأحاسيس لدى الإنسان وأكثرها أساسية . وتشير المراجع إلى أن البحث فى طبيعة الحرارة يعود على الأقل إلى القرن الأول قبل الميلاد ، حيث كتب الشاعر الرومانى لوكريتيوس أن الحرارة ما هى إلا مادة كغيرها من المواد . ولكن الاقتناع بأن الحرارة صورة من صور الطاقة لم يتحقق إلا فى حوالى منتصف القرن التاسع عشر . وتوضح قصة الأفكار المتنافسة عن طبيعة الحرارة ووجهات النظر المؤيدة لكل منها الطبيعة الحقيقية للتقدم العلمي ؛ ليس هذا فقط ، ولكنها أيضًا موضوع فى غاية الأهمية . ويعتبر المؤرخ كاجورى أن القانون الأول للديناميكا الحرارية « أعظم تعميم تحقق فى الفيزياء فى القرن التاسع عشر » . فنحن الآن نعيش فى عصر يعتمد اعتمادًا أساسيًا على تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكى (آلات الاحتراق الداخلى والتوربينات البخارية على سبيل المثال) ، بحيث يمكن وصف اقتصادنا المعاصر بأنه « اقتصاد ديناميكى حرارى » .

وكانت هناك نظريتان متنافستان أساسيتان للحرارة : الأولى هى نظرية السيال الحرارة المادى (الكالوريك) ، والثانية نظرية الطاقة التى تعتبر أن الحرارة تتمثل فى حركة جزيئات المادة . ويعتبر ديسكارتس وبويل ونيوتن من أشهر علماء القرن السابع عشر الذين تزعموا الاتجاه الثانى ، إذ كانت وجهة نظرهم أن الحرارة هى الحركة الاهتزازية لجسيمات المادة . ولكن هذه النظرية كانت تفتقر إلى الأساس العلمى الرصين الذى يمكن أن يدعمها ، ولذلك نبذت خلال القرن الثامن عشر وسادت نظرية الكالوريك . وقد شهدت هذه الفترة بالتحديد ابتكار الآلة البخارية على يدى كل من توماس نيوكومن فى انجلترا وجيمس واط فى اسكتلندا .

تفترض نظرية الكالوريك فرضين أساسين : (1) أن الكالوريك مائع (سائل) له القدرة على اختراق جميع الفراغات ، كما يستطيع الانسياب إلى جميع الأجسام إلى الداخل أو إلى الخارج ، (2) أن الكالوريك ينجذب بشدة إلى المادة ، ولكنه يتنافر مع نفسه . وطبقًا لهذه النظرية يتعين تركيب المادة باتزان التجاذب التثاقلى للذرات تجاه بعضها البعض والتنافر الذاتى للكالوريك الموجود بالجسم . (تذكر أن التركيب الكهرومغناطيسى للمادة لم يكن معروفًا فى ذلك الوقت ، وأن قياس شدة قوة التجاذب التثاقلى G لم يتحقق قبل نهاية القرن) . هذا وقد طبقت فكرة المائع « غير القابل للوزن » والذى يتخلل المادة مرات كثيرة فى التاريخ محاولة لتفسير العديد من الظواهر الفيزيائية .

وقد نجحت نظرية الكالوريك فى تفسير كثير من الحقائق المشاهدة عمليًا . فالأجسام الساخنة تحتوى على كمية أكبر من الكالوريك ، بينما تحتوى الأجسام الباردة إلى كمية أقل منه . كما أمكن تفسير تسخين الأجسام أو تبريدها بزيادة كمية الكالوريك فى الجسم نتيجة لانسيابه إلى داخل الجسم ، أو بنقص كميته نتيجة لانسيابه إلى خارج الجسم . وعند ارتفاع درجة الحرارة سوف تسبب الزيادة فى كمية الكالوريك تمدد الجسم بسبب التنافر الذاتى للكالوريك . كذلك فإن انصهار الجوامد قد أمكن تفسيره بأن كمية الكالوريك فى الجسم تزداد زيادة هائلة عند نقطة الانصهار ، وتزداد تبعًا لذلك قوة التنافر الذاتية للكالوريك بحيث يمكنها التغلب على قوى التجاذب التى تحفظ الذرات فى أماكنها ، وبذلك يحدث الانصهار . أما فى المواد الغازية فإن التأثيرات التجاذبية بين الذرات تكون مهملة .

ولكى يتسع نطاق تطبيقات نظرية الكالوريك قام الاسكتلندى جوزيف بلاك بتقسيم الكالوريك إلى صنفين متميزين : الكالوريك **الكامن** والكالوريك **المحسوس** ، حيث يرتبط الكالوريك المحسوس بالتغيرات فى درجة الحرارة . أما الحرارة المرتبطة بعملية تحول طورى كالتجمد فقد أمكن تفسيرها بأن الكالوريك يتحد فى الحقيقة مع الذرات فى هذه العملية متحولاً من كالوريك محسوس إلى كالوريك كامن ؛ ويحدث العكس تمامًا فى عملية التحول الطورى العكسى ، إذ يتحول الكالوريك مرة ثانية من الصورة المحسوسة إلى الكامنة . كذلك أمكن تفسير تولد الحرارة بالطرق أو الحك بأن ذلك يحدث نتيجة « لاعتصار » بعض الكالوريك المحسوس من المادة الصلبة . وبطريقة مشابهة أمكن أيضًا تفسير ارتفاع درجة غليان المادة بزيادة الضغط ،

فعندما يزداد الضغط المؤثر على المادة قرب نقطة الغليان تسبب الزيادة فى الضغط اعتصار بعض الكالوريك المحسوس من المادة ، ولهذا يتحتم أن تصل درجة حرارة المادة إلى قيمة أعلى حتى تسترد ما يكفى من الكالوريك لتبخيرها .

كان الأمريكى بنيامين طومسون ، والمشهور باسم كونت رمفورد ، أول من هاجم نظرية الكالوريك هجومًا عمليًا مركزًا فى نهاية القرن الثامن عشر . ففى عام 1775 غادر طومسون أمريكا إلى أوروبا ، حيث أنعم عليه أمير بافاريا بلقب كونت فى عام 1790 تقديرًا لإنجازاته القيمة خلال سنوات طويلة . وبينما كان طومسون يقوم بعمله المعتاد فى الإشراف على ثقب مواسير المدافع العملاقة ، أجرى هذا الرجل العديد من التجارب التى أثبتت أن هناك علاقة وثيقة بين الشغل الميكانيكى المبذول بواسطة المثقاب وتولد الحرارة بشكل غير محدود ، فقد لاحظ أن الحرارة تتولد باستمرار أثناء عمل المثقاب ويتوقف تولدها بتوقفه . وبناء على ذلك نبذ رمفورد فكرة أن الحرارة تأتى من مصدر محدود للكالوريك يحتوى عليه معدن الماسورة .

كذلك أجرى رمفورد بعض التجارب التى قام بتصميمها لقياس وزن السيال الحرارى . وتتلخص فكرة هذه التجارب فى محاولة قياس أى فرق فى الوزن بين الأجسام الساخنة والباردة ، وخاصة الفرق فى وزن الماء عند التحول الطورى . كانت تجارب رمفورد فى غاية الدقة ، ومع ذلك لم تبين هذه التجارب حدوث أى تغير فى الوزن نتيجة لانسياب الكالوريك المفترض داخل أو خارج عيناته . هذه التجارب وغيرها من التجارب المتعلقة بالتوصيل الحرارى أقنعت رمفورد أن الحرارة ناتجة عن **الحركة الجزيئية** وليست ناشئة عن مادة عديمة الوزن لا ينضب لها معين . ومما يثير الدهشة والسخرية فى نفس الوقت أن يتزايد عدد مؤيدى نظرية الكالوريك خلال النصف الأول من القرن التاسع عشر ، هذا بالرغم من العديد من العلماء البارزين المؤيدين لرمفورد ، مثل السير همفرى دافى وتوماس يونج .

كان الفيزيائى الإنجليزى جيمس برسكوت جول (1818 – 1889) أول من أثبت التكافؤ الكمى بين الشغل الميكانيكى وتوليد الحرارة . وقد أجرى جول تجاربه فى توليد الحرارة باستخدام التيار الكهربائى واحتكاك المياه المتدفقة وانضغاط الهواء وتأثير العجلات ذات البدالات أثناء تقليب الماء . وقد أعلن جول قياساته للمكافئ الميكانيكى للحرارة فى أكسفورد عام 1849 . ولا ننسى هنا أن نشير إلى ما لقيه جول من التقدير العظيم والاهتمام البالغ من قبل الشاب وليام طومسون ، لورد كلفن فيما بعد ، وهو أحد أشهر رجال العلم فى إنجلترا . هذا وقد قام آخرون ، وخصوصًا الفيزيائى الأمريكى هنرى رولاند ، بتنقيح نتائج تجارب جول الأولى . وسوف يظل عام 1847 هو التاريخ الحقيقى الذى شهد التأكيد النهائى الحاسم للقانون الأول للديناميكا الحرارية ، والذى يتعامل مع الحرارة باعتبارها طاقة داخلية ميكانيكية . وفى الحقيقة فإن الصيغة التى تعبر عن التكافؤ الميكانيكى للحرارة ، 1 kilocalorie = 4184 N.m ، والتى تبدو الآن عادية تمامًا ، تعتبر واحدة من أهم صيغ الميكانيكا الكلاسيكية . لا عجب إذن أن يطلق اليوم على الوحدة نيوتن ـ متر اسم **الجول** .

11-3 وحدات الحرارة

حيث أن الحرارة والطاقة الحرارية صورتان من صور الطاقة ، فإن وحدتهما الأساسية فى النظام SI هى الجول . ومع ذلك فإن هناك وحدات أخرى لقياس الحرارة تسمى **الوحدات الحرارية** ، وقد كانت هذه الوحدات تستخدم على نطاق واسع قبل أن يعرف أن الحرارة صورة من الطاقة . ونظرًا لأن هذه الوحدات مازالت تستعمل كثيرًا حتى الآن ، فلا بأس من الإشارة إليها هنا باختصار .

أولى هذه الوحدات هى **السعر** (cal) ، والتعريف الأصلى للسعر هو أنه كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة سيليزية واحدة (1°C) .

أما السعر الغذائى فيساوى 1000 cal ، أى **كيلو سعر** (kcal) واحد ، وهو يكتب بالحرف الكبير هكذا Cal ويسمى أيضًا بالسعر الكبير . وهناك أيضًا وحدة حرارية أخرى تسمى **الوحدة الحرارية البريطانية و ح ب (Btu)** ؛ والتعريف الأصلى لهذه الوحدة هو أنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء بمقدار درجة فهرنهيتية واحدة (1°F) .

وبعد أن تأكد أن الحرارة صورة من الطاقة ، قام طومسون وجول بإجراء قياسات عديد لتعيين **المكافئ الميكانيكى للحرارة** ، والذى يمكن استخدامه لتحويل الوحدات الحرارية التقليدية إلى جولات . واليوم يعرف السعر (cal) والوحدة الحرارية البريطانية (Btu) بدلالة الجول :

$$1\ \text{cal} = 4.184\ \text{J}$$

$$1\ \text{Btu} = 1054\ \text{J}$$

11-4 السعة الحرارية النوعية

لكى نرفع درجة حرارة جسم ما يجب علينا أن نزيد الطاقة الحرارية لجزيئاته ، ويمكن تحقيق ذلك بالسماح للحرارة بأن تنساب إلى هذا الجسم من جسم آخر أكثر سخونة . وبالمثل ، إذا أردنا تبريد جسم ما فإننا نستطيع ذلك بالسماح للحرارة بأن تنساب من هذا الجسم إلى جسم آخر أكثر برودة . ولكى يمكننا وصف عمليات التسخين والتبريد هذه وصفًا كميًا يجب معرفة كمية الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة الجسم .

تعرف كمية الحرارة التى يجب أن تنساب من أو إلى وحدة الكتلة من المادة حتى تتغير درجة حرارتها بمقدار درجة واحدة باسم السعة الحرارية النوعية للمادة .

وبناء على ذلك ، عندما تنتقل كمية من الحرارة Q إلى كتلة قدرها m من المادة ، سوف ترتفع درجة حرارة هذه الكتلة بمقدار ما ، وليكن ΔT . إذن : من التعريف* :

$$\text{السعة الحرارية النوعية}\ c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

ومنه يمكننا كتابة :

$$Q = cm\Delta T \qquad (11\text{-}1)$$

ويمكننا أن نرى من التعريف أن وحدات السعة الحرارية النوعية هى J/kg.C° ، هذا رغم أن الوحدات الشائع استعمالها هى cal/g.C° . وعليك أن تثبت بنفسك أن :

$$1\ \text{cal/g.C}^\circ = 4184\ \text{J/kg.C}^\circ$$

* يمثل الرمز Q كمية الحرارة المنتقلة إلى المادة . وتعنى الإشارة الموجبة للكمية Q أن الحرارة تضاف إلى المادة ، أما إذا كانت Q سالبة فذلك يعنى أن المادة تلفظ الحرارة خارجها . أما الرمز ΔT فيمثل التغير فى درجة الحرارة نتيجة للانتقال الحرارى .

يمثل الجدول 1-11 قيم c النموذجية لبعض المواد . لاحظ أن $c = 1.000\ cal/g.C°$ فى حالة الماء . وسوف نرى فيما بعد أن السعة الحرارية النوعية تتغير تغيرًا طفيفًا مع درجة الحرارة ، ولكن يمكن اعتبار أن القيم المعطاة بالجدول ثابتة بالقرب من درجة الغرفة . ويلاحظ أنه إذا كانت قيمة c كبيرة فذلك يعنى أن المادة تحتاج إلى كمية كبيرة نسبيًا من الحرارة لكل جرام كى تتغير درجة حرارتها بمقدار معين . كذلك فإن صغر قيمة c يعنى أن درجة حرارة المادة T تتغير بمقدار كبير عندما تمتص المادة كميات صغيرة نسبيًا من الحرارة . وبناء على ما سبق مناقشته فى الجزء 2-11 يمكننا أن نتوقع أن الحرارة النوعية للغازات ذات الجزيئات المعقدة أكبر مما فى حالة الغازات البسيطة أحادية الذرة . ذلك أن الحرارة الممتصة تتوزع بين العديد من أنواع الطاقة الداخلية ، وهذا ما سوف نتناوله بالمناقشة تفصيلاً فى الفصل الثانى عشر .

جدول 1-11 : السعة الحرارية لبعض المواد

المادة	$c\ (cal/g.C°)$	$c\ (J/kg.C°)$
ماء	1.000	4184
جسم الإنسان	0.83	3470
كحول إيثيلى (إيثانول)	0.55	2300
بارافين	0.51	2100
ثلج (0°C)	0.50	2100
بخار (100°C)*	0.46	1920
ألمنيوم	0.21	880
زجاج	0.15	600
حديد	0.11	460
نحاس	0.093	390
زئبق	0.033	140
رصاص	0.031	130

* عند ثبوت الحجم

مثال 1-11 :

ما هى كمية الحرارة اللازمة لتغير درجة حرارة (أ) 400 g من الماء من 18.0°C إلى 23.0°C ؟ (ب) 400 g من النحاس من 23.0°C إلى 18.0°C ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين كمية الحرارة المضافة والتغير فى درجة الحرارة ؟

الإجابة : تحتوى هذه العلاقة على كتلة المادة وحرارتها النوعية :

$$Q = cm\,\Delta T$$

سؤال : ما هى الوحدات اللازم استخدامها ؟
الإجابة : يجب أن تتفق وحدات الحرارة النوعية مع وحدات كل من m و Q . ولدينا بالجدول 1-11 اختياران لهذه الوحدات .

الحل والمناقشة :

(أ)
$$Q = (1.00\ \text{cal/g . C°})(400\ \text{g})(+5.00\ \text{C°}) = 2000\ \text{cal}$$

وباستخدام الوحدات SI :

$$Q = (4184\ \text{J/kg . C°})(0.400\ \text{kg})(+5.00\ \text{C°}) = 8370\ \text{J}$$

(ب) لاحظ أن $\Delta T = -5.00\ \text{C°}$ ، وأن c هنا هى الحرارة النوعية للنحاس :

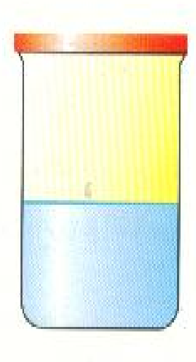
$$Q = (0.093\ \text{cal/g . C°})(400\ \text{g})(-5.00\ \text{C°}) = -190\ \text{cal} = -780\ \text{J}$$

فى الجزء (أ) تكون الحرارة مضافة إلى الماء (إشارة Q موجبة) ، وفى الجزء (ب) تلفظ الحرارة من النحاس (إشارة Q سالبة) .

تمرين : عين درجة الحرارة النهائية لكمية قدرها 700 g من النحاس تضاف إليها كمية من الحرارة قدرها 400 J إذا كانت درجة حرارتها الأصلية 16.0°C . **الإجابة** : 17.5°C .

5-11 الغليان وحرارة التبخير

لنناقش الآن ما يحدث عندما يتبخر سائل ما . من المعلوم أن جزيئات السائل تؤثر على بعضها البعض بقوى تجاذبية متبادلة قوية إلى حد ما . (قوى التجاذب ذات طبيعة كهربائية أساسًا) . وإذا نظرنا إلى الجزيئات الموجودة على سطح السائل سنجد أن الغالبية العظمى منها لا تستطيع الهرب إلى المنطقة الواقعة خارج السطح . ولكن ، كما فى حالة الغازات ، يحدث أن يكتسب القليل من هذه الجزيئات طاقة كبيرة جدًا بسبب الحركة الحرارية ، وهذا ما نوقش تفصيلاً فى الجزء 6-10 . ونتيجة لذلك يمكن أن تهرب مثل هذه الجزيئات من سطح السائل متحولة بذلك من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية ، وتسمى هذه العملية **بالتبخير أو التصعيد** .



شكل 3-11:
عندما يكون البخار مشبعًا داخل إناء مغلق ، يتساوى عدد الجزيئات المتبخرة من السائل تمامًا مع عدد الجزيئات المتكثفة من البخار إلى السائل .

ونظرًا لأن أعلى الجزيئات طاقة هى وحدها التى تهرب من السطح ، فإن ذلك يؤدى إلى نقص متوسط طاقة الجزيئات المتبقية مع استمرار عملية التبخر . ومن ثم فإن درجة حرارة السائل المعزول يجب أن تقل نتيجة للتبخر ؛ وذلك لأن درجة الحرارة ، كما نعلم ، مقياس لطاقة حركة الجزيئات . وهكذا نكون قد وصلنا إلى تفسير تلك الحقيقة المعروفة بأن التبخر يسبب تبريدًا للسائل .

بناء على ذلك يمكن القول أنه إذا أريد لجزيئات السائل أن تهرب من سطح السائل فإن من الضرورى تزويدها بالطاقة اللازمة . وتعرف كمية الطاقة اللازمة لذلك ، والتى تختلف من مادة إلى أخرى ، باسم حرارة التبخير ، وتعريفها كالتالى :

تسمى الطاقة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة من المادة من الطور السائل إلى الطور البخارى (الغازى) بحرارة تبخير (H_v) تلك المادة .

$$Q = mH_v \tag{11-2}$$

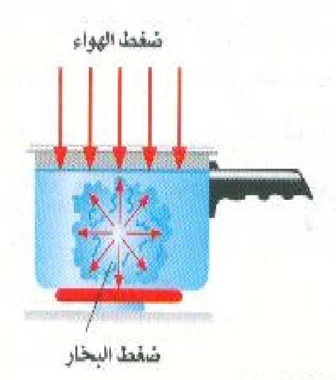
وعندما تتكثف وحدة الكتلة من المادة من الطور البخارى إلى الطور السائل سوف تنطلق نفس هذه الكمية من الطاقة من المادة ؛ ويوضح الجدول 2-11 قيم H_v لبعض المواد المألوفة .

جدول 2-11 حرارة التبخير وحرارة الانصهار لبعض المواد المألوفة

المادة	نقطة الانصهار (°C)	نقطة الغليان (°C)	H_v cal/g	H_v kJ/kg	H_f cal/g	H_f kJ/kg
هليوم	-270	-269	21	5.0	5.2	1.25
أكسجين	-219	-183	210	51	13.8	3.3
نيتروجين	-210	-196	200	48	25.5	6.1
إيثانول (كحول إيثيلى)	-114	78	854	204	105	25
زئبق	-39	357	270	65	11.7	2.8
ماء	0	100	2260	539	335	80
رصاص	357	1750	858	205	23	5.9
ألمنيوم	660	2450	10500	2520	397	95
ذهب	1063	2660	1580	377	64	15.4
نحاس	1083	2595	4810	1150	205	49

* عند ضغط قدره 1atm

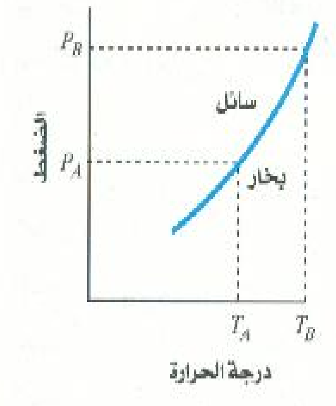
يغلى السائل عندما تتكون الفقاعات البخارية وتنمو داخله . ولكى يمكننا فهم ما يحدث فى هذه العملية يجب أن نفهم أولاً ما هو **ضغط البخار** . لنفرض أن لدينا سائلاً وبخاره فى إناء مغلق كالمبين بالشكل 3-11 . فى مثل هذا الموقف يتحقق الاتزان بين السائل وبخاره عندما يتزن عدد الجزيئات المتبخرة من السائل مع عدد الجزيئات المتكثفة من البخار إلى السائل . ويسمى ضغط بخار السائل فى حالة الاتزان هذه بضغط البخار (أو الضغط البخارى) للسائل . وبالطبع فإن ضغط البخار يزداد بزيادة درجة الحرارة . لماذا ؟



شكل 4-11:
درجة الغليان هى درجة الحرارة التى يتساوى عندها ضغط البخار داخل الفقاعة مع الضغط الخارجى المؤثر على السائل . (حجم الفقاعة مبالغ فى تكبيرة) .

لنفرض الآن أن لدينا كمية من سائل فى إناء مفتوح بحيث يقطع سطحه تحت تأثير الضغط الجوى كما هو مبين بالشكل 4-11 ؛ ولننظر هذه المرة إلى الجزيئات الموجودة داخل السائل . ونظرًا للحركات العشوائية للجزيئات داخل السائل ، يحدث بين حين وآخر أن تكتسب مجموعة من الجزيئات كمية كافية من الطاقة لفصلها عن بعضها

البعض ، وبذلك يتكون حيز خالٍ ، أو ثقب ، داخل السائل ، وعندئذ تتبخر بعض الجزيئات من السائل إلى الثقب ، ومن ثم يرتفع ضغط البخار داخله . وبمرور الوقت يمكن أن يصل ضغط البخار داخل الثقب إلى قيمة مساوية لضغط البخار عند درجة حرارة السائل . فإذا كانت درجة الحرارة منخفضة سيكون الضغط داخل الثقب صغيرًا مما يؤدى إلى ضموره وفنائه تحت تأثير الضغط الجوى على سطح السائل . أما إذا كانت درجة الحرارة مرتفعة فسوف يكون الضغط داخل الثقب كبيرًا ، ربما أكبر من الضغط داخل السائل نتيجة لتأثير الضغط الجوى . وفى هذه الحالة سوف تتسبب الزيادة فى الضغط داخل الثقب ، الذى أصبح الآن فقاعة مليئة بالبخار ، فى تمدد الفقاعة . وتحت تأثير قوة الطفو المؤثرة على الفقاعة ، وعلى الكثير من مثيلاتها الأخريات ، سوف ترتفع الفقاعة إلى سطح السائل وتنفجر ، وهى الظاهرة التى نعرفها باسم الغليان . وهكذا نرى أن السائل يصل إلى حالة حرجة عندما تصبح درجة الحرارة عالية بدرجة كافية لكى يتساوى ضغط بخار السائل مع الضغط الجوى فوق سطحه . وعندئذ تتكون الفقاعات المليئة بالبخار وتنمو داخل السائل فيما يعرف بالغليان .



شكل 5-11:
منحنى تبخير نموذجى . يحدث الغليان عند درجة T_A عندما يكون الضغط P_A . وترتفع نقطة الغليان إلى T_B عند زيادة الضغط إلى P_B .

يغلى السائل عند درجة الحرارة التى يتساوى عندها ضغط البخار تمامًا مع الضغط الخارجى على السائل .

وحيث أن ضغط البخار عند درجة 100°C يساوى 101 kPa فى حالة الماء ، وبما أن 1 atm = 101 kPa ، فإن الماء يغلى عادة عند درجة 100°C . ولكن الضغط الجوى فى المناطق الجبلية العالية يمكن أن يصل إلى 80 kPa نقط ، ولذلك يغلى الماء فى مثل هذه المناطق عند حوالى 94°C . هذا ويمثل الجدول 2-11 نقط غليان بعض السوائل المعروفة عند الضغط الجوى المعتاد (P_a = 101 kPa) . وبقياس نقطة غليان المادة عند ضغوط محيطة مختلفة وتمثيل النتائج بيانيًا سوف نحصل على منحنى كالمبين بالشكل 5-11 فى حالة الماء ؛ ويعرف الخط الفاصل بين السائل والبخار باسم **منحنى التبخير** . ولإيجاد نقطة غليان السائل عند ضغط معين باستخدام منحنى التبخير ، نرسم خطًا أفقيًا عند هذا الضغط ثم نوجد نقطة تقاطعه مع المنحنى . وبإسقاط عمود من نقطة التقاطع هذه على المحور الأفقى سوف نحصل على درجة الغليان المطلوبة عند الضغط المعنى . ومن الجدير بالذكر أن الغليان مثال لما يسمى **تغير الطور** ، ولذلك يسمى الشكل 5-11 **برسم بيان الطور** . لاحظ من الشكل 5-11 أن درجة غليان الماء ترتفع بارتفاع الضغط عليه .

من المهم أن نفهم تمامًا أنه **عندما تمر عينة من المادة بعملية تغير فى الطور فإن الحرارة المضافة إلى المادة أو المفقودة بواسطتها لا تغير درجة حرارة المادة إلى أن يتغير طور العينة بأكملها إلى الطور الجديد** . فإذا ما أشعل الموقد تحت قدر من الماء المغلى فإن ذلك سوف يسبب غليان الماء بشكل أكثر عنفًا ، **ولكن درجة الحرارة لن**

ترتفع . ذلك أن الحرارة المصاحبة لتغير طور المادة من سائل إلى غاز تتحدد بكتلة العينة وحرارة تبخير المادة تبعًا للمعادلة 2-11 .

11-6 الانصهار وحرارة الانصهار



(أ)



(ب)

تغيران مختلفان للطور : (أ) تحول الماء من الطور الصلب إلى الطور السائل (انصهار) ، (ب) تحول ثانى أكسيد الكربون من الطور الصلب إلى الطور الغازى (تسامى) .

تنصهر بلورات الثلج عند درجة 0°C تحت الضغط الجوى القياسى . وقبل الانصهار تكون جزيئات الماء فى الثلج مرتبة فى نسق بلورى ذى ترتيب محكم ، حيث تحفظ الجزيئات فى موضعها بواسطة قوة التجاذب القوية المتبادلة بين الجزيئات . ولصهر البللورة يجب أن تنتزع الجزيئات من هذا الترتيب المحكم بحيث لا يصبح ترتيبها منتظمًا . هذه العملية تحتاج إلى طاقة ، وعادة تزود المادة بهذه الطاقة على هيئة حرارة .

يتضح من ذلك إذن أنه عند تسخين مادة بلورية فإنها تبدأ فى الانصهار عند درجة حرارة معينة . وإذا ما أضيفت الحرارة ببطئ شديد إلى الخليط المكون من المادة البلورية والسائل سوف تظل درجة الحرارة ثابتة إلى أن يتم انصهار جميع البلورات . ولكل مادة نقطة انصهار معينة ، ولكى تنصهر المادة البلورية يجب تزويدها بكمية معين من الحرارة ـ تسمى **حرارة الانصهار** ـ عند هذه الدرجة .



كمية الحرارة اللازمة لتغير طور وحدة الكتلة من الطور الصلب إلى الطور السائل تسمى حرارة انصهار المادة (H_f) .

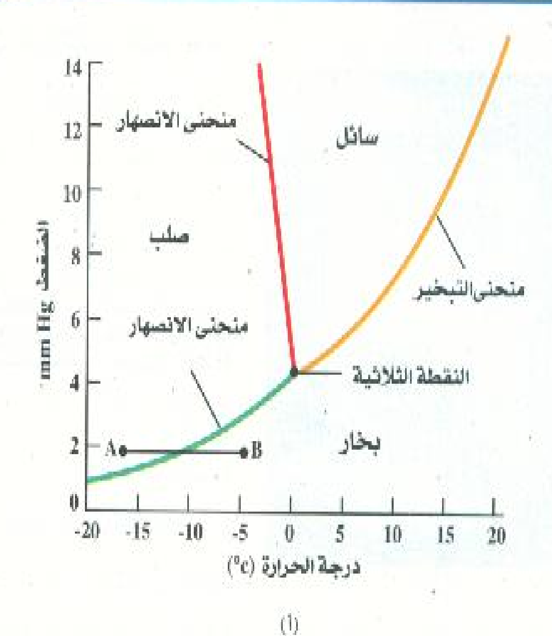
$$Q = mH_f \qquad (11\text{-}3)$$

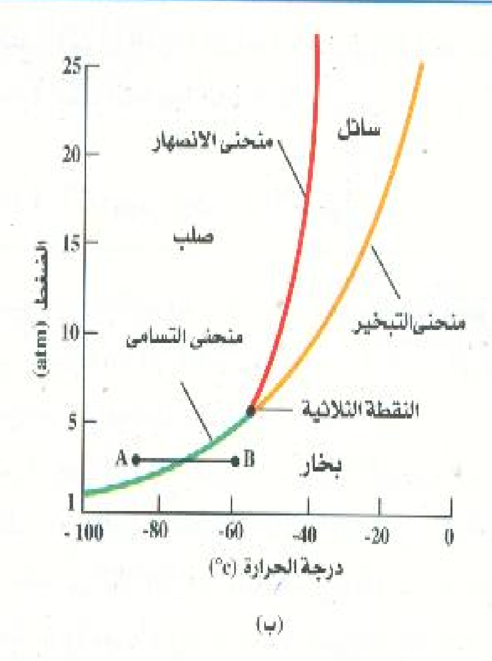
وعندما تتحول وحدة الكتلة من المادة من الطور الصلب إلى الطور السائل سوف تتحرر نفس هذه الكمية من الطاقة من المادة .

وكما فى حالة التبخير فإن الحرارة المضافة إلى المادة أو المفقودة منها أثناء تحولها من الصلابة إلى السيولة أو من السيولة إلى الصلابة لا تغير درجة حرارة المادة إلى أن يتغير طور العينة بأكملها .

وحرارة انصهار الماء تساوى 335 kJ/kg (80 cal/g) ، ويوضح الجدول 2-11 قيم حرارة الانصهار لبعض المواد الأخرى . لاحظ أن حرارة انصهار وحرارة تبخير المواد ذات الرابطة الهيدروجينية ؛ كالماء ؛ والإيثانول (الكحول الإيثيلى) أكبر من الأخرى . لماذا ؟

يمكن تغيير نقطة تجمد السائل بتطبيق ضغط كبير على النظام . فإذا كانت المادة تنكمش عند تجمدها فإن نقطة الانصهار سوف ترتفع بزيادة الضغط ، وهذا هو سلوك معظم المواد بالفعل . ولكن قليلاً من المواد ، كالماء مثلاً ، يتمدد عند التجمد ، وفى هذه الحالة سوف تؤدى زيادة الضغط إلى انخفاض نقطة تجمد مثل هذه المواد . لذلك فإن ضغط المتزلج على الثلج على نصل حذائه قد يسبب انصهار الثلج تحته . وفى هذه الحالة يكون المتزلج متزلجا فى الحقيقة على الثلج المشحم بغشاء رقيق من الماء . ويمكن ملاحظة هذا السلوك بالاستعانة بما يسمى **منحنى انصهار** المادة ، وهو المنحنى الذى





شكل 6-11:
رسم بيان الطور لكل من (أ) الماء ، (ب) ثانى أكسيد الكربون لاحظ موضع النقطة الثلاثية بالرسم .

يبين كيف تعتمد نقطة الانصهار على الضغط ، ويمثل الشكل 6-11 أمثلة لهذه المنحنيات بالنسبة للماء وثانى أكسيد الكربون . وحيث أن درجة الانصهار تعتمد اعتمادًا طفيفًا على الضغط ، فإن هذه المنحنيات تكون رأسية تقريبًا . ومن الجدير بالملاحظة هنا أن ميل منحنى الانصهار لمعظم المواد ، كثانى أكسيد الكربون مثلاً ، يكون موجبًا . وعلى العكس من ذلك فإن منحنى انصهار الماء يكون ذا ميل صغير سالب . هذا يبين أن زيادة الضغط تسبب انخفاض درجة الانصهار ، مما يعكس حقيقة أن الماء يتمدد عند تجمده .

ويوضح رسم بيان الطور الكامل أيضًا أنه إذا قل الضغط عن قيمة معينة ، فإن المادة يمكن أن تتحول من الطور الصلب إلى الغازى مباشرة دون المرور على الطور السائل إطلاقًا ، وهذه العملية تسمى **التسامى** ، هذا ويتضمن الشكل 6-11 أيضًا منحنى التسامى لكل من الماء وثانى أكسيد الكربون . لاحظ الفرق الكبير فى قيم الضغط على المحورين الرأسيين للمنحنيين .

يوضح الشكل 6-11 كذلك أن لكل مادة نقطة واحدة تتقاطع عندها المنحنيات الثلاثة الفاصلة بين الأطوار المختلفة للمادة . هذه النقطة التى تمثل زوجًا فريدًا من الضغط ودرجة الحرارة ، والذى يختلف من مادة إلى أخرى ، تسمى **النقطة الثلاثية** لتلك المادة . ويمكننا أن نجد من الشكل أن النقطة الثلاثية للماء توجد عند درجة الحرارة 0.01°C والضغط 4.58 torr (0.006 atm) ؛ أما فى حالة ثانى أكسيد الكربون فإن إحداثيى النقطة الثلاثية هما -56.6°C و 5.11 atm .

ويمكننا أن نرى من الشكل 6-11 أن التسامى لا يمكن حدوثه إلا إذا كان الضغط على المادة أقل من الضغط عند النقطة الثلاثية للمادة ، ويمثل الخطان AB مثالين لعمليتى تسامى الماء وثانى أكسيد الكربون . وكلنا يعلم أن ثانى أكسيد الكربون

يتسامى عند الضغط الجوى المعتاد ، وذلك لأن 1 atm أقل كثيرًا من الضغط عند النقطة الثلاثية لهذه المادة . وبناء على ذلك فإن تحول وصول CO_2 إلى الطول السائل يستلزم زيادة الضغط عن 5.11 atm . وفي الختام نقول أن التسامي يرتبط بما يعرف باسم **حرارة التسامى** ، تمامًا كما أن الانصهار والتبخير مرتبطان بحرارتى الانصهار والتبخير السابق مناقشتهما .

مثال توضيحى 11-1

ما هى كمية الحرارة المتحررة من 50 g من الماء (أ) عند تحولها من الطور السائل إلى الطور البلورى عند درجة 0°C ؟ (ب) عند تحولها من بخار إلى سائل عند درجة 100°C ؟

استدلال منطقى :

(أ) عندما تتبلور الكتلة m تتحرر منها كمية قدرها mH_f من الطاقة . إذن :

$$Q = mH_f = (50\ g)(80\ cal/g) = 4000\ cal = 16{,}700\ J$$

(ب) كمية الحرارة المتحررة من كتلة قدرها m من غاز عند تكثفها تساوى mH_v وعليه :

$$Q = mH_v = (50\ g)(539\ cal/g) = 27{,}000\ cal = 113{,}000\ J$$

لاحظ أن التحول الطورى من بخار إلى ماء يحرر كمية أكبر كثيرًا من الحرارة بالمقارنة بالتحول الطورى من ماء إلى ثلج .

تمرين : ما هى كمية الحرارة اللازمة لصهر 500 g من الرصاص عند درجة 327°C .

الإجابة : 4.29×10^5 J .

11-7 قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)

تجرى الكثير من التجارب المتعلقة بالحرارة فى إناء يسمى **المسعر** ، وهو جهاز يعزل المواد عزلاً حراريًا بحيث لا تستطيع الحرارة أن تسرى منها أو إليها من الوسط المحيط . وتعتبر قارورة الترموس العادى مسعرًا جيدًا إلى حد كبير ، إذ لا تتمكن الحرارة من المرور خلال الجدار الزجاجي المزدوج بفضل الطلاء المعدنى اللامع الذى تحمله والفراغ الموجود بين الجدارين . وسوف نرى فى الأجزاء 9-11 إلى 11-11 مدى فاعلية هذا التصميم فى عزل محتويات الترموس عزلاً حراريًا عن الوسط المحيط .

لنفرض أننا وضعنا مادتين أو أكثر ذات درجات حرارة مختلفة سويًا فى المسعر . هذه المواد سوف تتبادل الطاقة الحرارية فيما بينها إلى أن تصل جميعها إلى نفس درجة الحرارة ، أى إلى أن تصل إلى حالة الاتزان الحرارى . وحيث أن الطاقة لا يمكنها الانتقال من أو إلى المواد الموجودة بالمسعر ، فإن قانون بقاء الطاقة يقودنا إلى استنتاج هام

جدًا : إذا اعتبرنا أن كميات الحرارة المكتسبة تغيرات موجبة ، وكميات الحرارة المفقودة تغيرات سالبة ، فإن :

مجموع التبادلات الحرارية داخل المسعر تساوى صفرًا .

ويمكن صياغة هذا المعنى بأسلوب آخر على الصورة : الطاقة الكلية للنظام المعزول داخل المسعر لا تتغير .

وقبل تطبيق هذه الفكرة على مختلف الأمثلة ، لنراجع معًا أنواع التبادلات الحرارية التى قد تقابلنا .

1 ـ إذا تغيرت درجة حرارة كتلة قدرها m من درجة حرارة ابتدائية T_0 إلى درجة حرارة نهائية T_f ، فإن المعادلة 1–11 تخبرنا أن كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة تكون :

$$Q = mc\,(T_f - T_0)$$

حيث c السعة الحرارية النوعية للمادة . تذكر أن هذا ينطبق فقط على مدى درجات الحرارة التى لا يحدث فيها تغير فى طور المادة .

شكل 7–11:
عند إضافة الحرارة إلى مادة صلبة ترتفع درجة حرارتها حتى تصل إلى درجة الانصهار T_f . وباستمرار إضافة الحرارة يتغير طور المادة بدون أن يحدث أى تغير فى درجة حرارتها . وبعد أن تتحول المادة كلها إلى سائل تؤدى إضافة الحرارة إلى ارتفاع درجة الحرارة إلى أن تصل المادة إلى نقطة التبخر (الغليان) T_v . بعدئذ تثبت درجة الحرارة إلى أن يتم تبخر المادة كلها . بعد ذلك سوف تسبب الحرارة المضافة ارتفاع درجة حرارة الغاز .

2 ـ عند انصهار كتلة قدرها m من المادة ، تفيد المعادلة 2–11 أن الحرارة المتبادلة تساوى $Q_f = +mH_f$ ، أما فى حالة التبلور فإن الحرارة المتبادلة تكون $Q_f = -mH_f$.

3 ـ عند تبخر كتلة من المادة قدرها m ، توضح المعادلة 3–11 أن الحرارة المتبادلة تكون $Q_v = +mH_v$ ، وعند تكثف هذه المادة فإن التبادل الحرارى يساوى $Q_v = -mH_v$.

ويلخص الشكل 7–11 كميات الحرارة المرتبطة بارتفاع درجة حرارة المادة وتغيراتها الطورية . ويلاحظ هنا أن الحرارة النوعية تختلف باختلاف الطور ؛ فالحرارة النوعية للثلج وبخار الماء ، على سبيل المثال ، مختلفة عن قيمتها فى حالة الماء السائل . وطبقًا لمناقشتنا السابقة ، يلاحظ أيضًا أن الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة المادة أثناء تغير الطور لا تغير درجة حرارة هذه المادة .

مثال 2-11 :

يحتوى فنجان على 200 g من القهوة عند درجة 98°C . ما هى كتلة الثلج M ، ودرجة حرارته 0°C ، اللازم إضافتها لكى تتغير درجة حرارة القهوة إلى 60°C ؟ إهمل أى سريان للحرارة من القهوة إلى الفنجان ، أى افترض أن الفنجان مسعر مثالى .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى التبادلات الحرارية التى تحدث فى هذا الموقف ؟

الإجابة : سوف تفقد القهوة كمية من الحرارة لأن درجة حرارتها تقل بمقدار 38°C . وبفرض أن القهوة تتكون أساسًا من الماء ، يمكن اعتبار أن حرارتها النوعية $c = 1.0$ cal/g . C° . وبذلك تتوفر لنا كل البيانات اللازمة لحساب كمية الحرارة المفقودة . أما الثلج فإنه سوف يكتسب نفس هذه الكمية من الحرارة . ويتبقى علينا الآن حساب كتلة الثلج .

سؤال : ماذا يحدث عندما يكتسب الثلج هذه الحرارة ؟

الإجابة : أولاً ، سوف يمتص الثلج الحرارة أثناء انصهاره . بعدئذ ، وبعد تحول كل الثلج إلى ماء سائل ، سوف يؤدى امتصاصه للحرارة إلى رفع درجة حرارته (شكل 7-11) .

سؤال : إلى أى درجة حرارة يصل الثلج ؟

الإجابة : يجب أن يصل الماء والقهوة إلى نفس درجة الحرارة حتى يتحقق الاتزان الحرارى . إذن ، درجة الحرارة النهائية للماء والقهوة ، طبقًا للمعطيات ، تساوى 60°C .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى للحرارة الممتصة بواسطة الثلج والماء ؟

الإجابة : $Q_{gain} = Mh_f + cM(60°C - 0°C)$ = الحرارة الممتصة

حيث c هى الحرارة النوعية للماء .

الحل والمناقشة : كمية الحرارة المفقودة بواسطة القهوة هى :

$$Q_{lost} = (1.0 \text{ cal/g . C°})(200 \text{ g})(-38 \text{ C°}) = -7600 \text{ cal}$$

وبمساواة هذه الكمية بكمية الحرارة المكتسبة بواسطة الثلج :

$$Q_{gain} = M(80 \text{ cal/g}) + M(1.0 \text{ cal/g . C°})(+60 \text{ C°}) = 7600 \text{ cal}$$

وبحل المعادلة السابقة سنجد أن M تساوى 54.3 g . لاحظ أن الانصهار يستهلك كمية قدرها $(54.3 \text{ g})(80 \text{ cal/g}) = 4344$ cal من الحرارة ، بينما تستهلك حرارة قدرها 3256 cal فى رفع درجة حرارة الثلج المنصهر إلى 60°C .

تمرين : أوجد درجة الحرارة النهائية إذا كانت كمية الثلج المضافة 40 g فقط .

الإجابة : 68°C .

مثال 11-3 :

أسقطت قطعة من فلز كتلتها 80.0 g ودرجة حرارتها 100°C فى مسعر مثالى يحتوى على 400 g من الزيت عند درجة 18.0°C . ما هى الحرارة النوعية للفلز c_m ؟ $c = 0.650$ cal/g . C° للزيت .

استدلال منطقى :

سؤال : ما نوع التبادلات الحرارية فى هذه المسألة ؟

الإجابة : سوف يفقد الفلز كمية من الحرارة أثناء تبريده من 100°C إلى 23.1°C . وسوف يكتسب الزيت نفس كمية الحرارة أثناء تغير درجة حرارته من 18.0°C إلى نفس درجة الحرارة النهائية وهى 23.1°C ، والبيانات المعطاة بالمسألة كافية لحساب هذه الكمية من الحرارة .

سؤال : ما هى المعادلة التى تنطبق على هذا الموقف بالتحديد ؟

الإجابة :

$$(80.0\ \text{g})(c_m)(-76.9\ \text{C}°) + (400\ \text{g})(0.650\ \text{cal/g . C}°)(+5.10\ \text{C}°) = 0$$

الحل والمناقشة : هذه المعادلة يمكن كتابتها على الصورة :

$$-(6150\ \text{g . C}°)c_m + 1330\ \text{cal} = 0$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى c_m نحصل على $c_m = 0.216$ cal/g . C°

مثال 11-4 :

يحتوى إناء زجاجى كبير على 500 g من الزئبق عند درجة 20°C . إذا غمر سخان كهربائى قدرته 70 W فى الزئبق ، فما هو الزمن الذى يستغرقه السخان فى تبخير 30 g من الزئبق ؟ إهمل كتلة السخان وافترض أن القدرة الكهربائية تستهلك كلها فى تسخين الزئبق فقط .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى البيانات اللازم معرفتها لحساب كمية الطاقة اللازمة لتبخير 30 g من الزئبق ؟

الإجابة : يجب معرفة الحرارة النوعية للزئبق ودرجة غليانه والحرارة الكامنة للتبخير .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى لكمية الحرارة اللازمة ؟

الإجابة : يجب أولاً تسخين كمية الزئبق كلها (500 g) إلى درجة الغليان قبل حدوث أى تبخر ، وبعدئذ يجب تزويد الزئبق بالحرارة الكامنة اللازمة لتبخير 30 g منه . إذن :

$$Q = (500\ \text{g})(c)(T_{\text{boil}} - 20°\text{C}) + (30\ \text{g})H_v$$

سؤال : ما علاقة قدرة السخان ، 70 W ، بالزمن ؟

الإجابة : تذكر أن القدرة = الطاقة / الزمن . وبما أن 1 W = 1 J/s ، وحيث أن كل هذه المعلومات معطاة بالوحدات SI ، يجب أن تكون c أيضًا بالوحدات SI . وبناء على ذلك فإن معادلة الزمن تكون $Q(\mathrm{J}) = (70\ \mathrm{W})t$.

الحل والمناقشة : تحسب Q باستخدام البيانات المعطاة فى الجدولين 1–11 و 2–11 :

$$Q = (0.500\ \mathrm{kg})(140\ \mathrm{J/kg\ .\ C^\circ})(357 - 20)\mathrm{C^\circ} + (0.30\ \mathrm{kg})(2.7 \times 10^5\ \mathrm{J/kg})$$
$$= 31{,}000\ \mathrm{J}$$

وعليه ، فإن الزمن المطلوب هو :

$$t = Q / 70\ \mathrm{W} = (31{,}000\ \mathrm{J})/(70\ \mathrm{J/s}) = 450\ \mathrm{s} = 7.5\ \mathrm{min}$$

تمرين : ما الزمن الذى يستغرقه نفس هذا السخان فى تبخير 50 g من ماء درجة حرارته الأصلية 100°C ؟ **الإجابة** : 27 min .

مثال 5-11 :

اصطدمت طلقة من الرصاص كتلتها 10 g تسير بسرعة قدرها 100 m/s بقالب من الخشب فاندفنت فيه . ما هو الارتفاع فى درجة حرارة الطلقة بالتقريب نتيجة للتصادم ؟ بفرض أن طاقة الحركة تتحول بأكملها إلى طاقة حرارية فى الطلقة وحدها .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى كمية الحرارة المتولدة أثناء وصول الطلقة إلى السكون ؟

الإجابة : هذه الكمية تساوى KE الابتدائية للطلقة كاملة : $\Delta \mathrm{KE}_{lost} = Q_{gained}$

سؤال : ما هى المعادلة التى تربط ارتفاع درجة بطاقة حركة الطلقة ؟

الإجابة : $\frac{1}{2}mv^2 = mc\Delta T$

الحل والمناقشة : باستخدام قيمة c للرصاص ، المعطاة بالجدول 1–11 ، نحصل على :

$$\Delta T = \frac{(1/2)v^2}{c} = \frac{(0.5)(100\ \mathrm{m/s})^2}{1.3 \times 10^2\ \mathrm{J/kg\ ^\circ C}}$$
$$= 39\ \mathrm{C^\circ}$$

عليك أن تتحقق من أن الوحدات تختصر مع بعضها البعض كما هو مبين . لاحظ أن ΔT تعتمد على مربع مقدار السرعة .

وعليه ، فإذا كانت درجة الحرارة الأصلية للطلقة 20°C ، فإن درجة حرارتها النهائية ستكون 59°C بالتقريب . وإذا كانت الطلقة متحركة بسرعة مقدارها 600 m/s ، فسوف تتضاعف ΔT بمقدار 36 مرة ، وستصبح درجة حرارتها النهائية عندئذ حوالى

1430°C . وبالطبع ستكون الطلقة قد انصهرت قبل وصولها إلى هذه الدرجة ، وبالتالى لن تكون الحسابات السابقة صحيحة . كيف يمكن إجراء الحسابات فى هذه الحالة ؟

مثال توضيحى 2-11

عندما يقول المتخصصون فى التغذية أن القيمة الغذائية لكل 1 kg من الخبز تساوى 2600 Cal فإن ذلك يعنى أنه إذا حرق الخبز فى الأكسجين النقى فإنه يعطى 2600 kcal من الحرارة لكل كيلو جرام . (يولد الجسم الحرارة من الطعام فى تفاعل كيميائى مشابه إلى حد ما) . قدر كمية الحرارة المنطلقة من الجسم كل يوم .

استدلال منطقى :

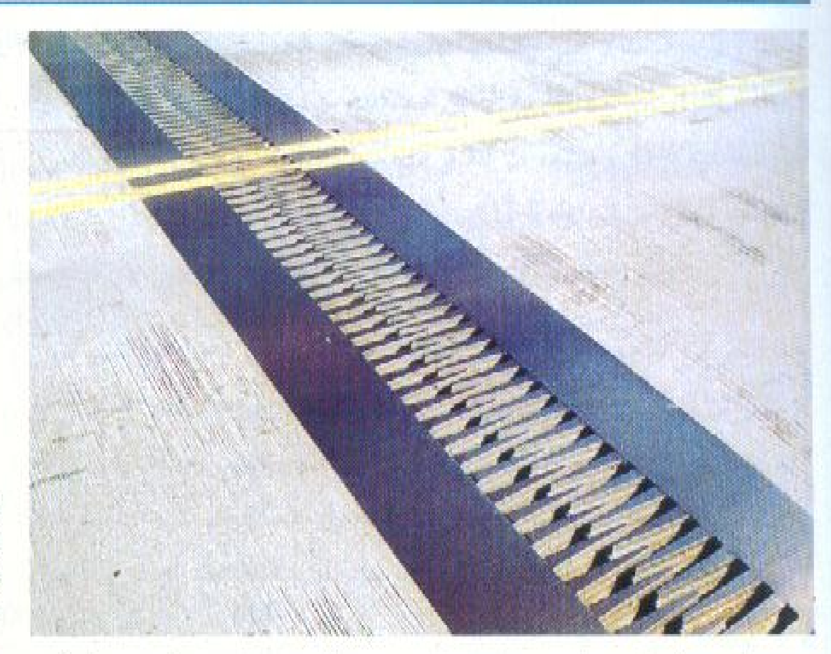
تختلف حاجة الإنسان اليومية من السعرات الغذائية من شخص إلى آخر ، ولكنها تتراوح بين 2000 Cal و 3000 Cal . وحيث أن هذه السعرات هى فى الواقع سعرات كبيرة (كيلو سعرات) ، فإن عملية الأيض (التمثيل الغذائى) تولد داخل الجسم حوالى 2×10^6 cal إلى 3×10^6 cal من الحرارة كل يوم . وحيث أن درجة حرارة الجسم ثابتة تقريبًا ، يجب أن يفقد الجسم يوميًا نفس هذه الكمية من الحرارة المتولدة . ومن المعلوم أن هواء الزفير وتبخر العرق من الجلد آليتان معروفتان لتبريد الجسم ، إلا أن هناك آليات أخرى لا تقل عنهما فى الأهمية .

تمرين : إذا أمكن لفتاة كتلتها 60 kg أن تحبس داخلها كل الطاقة التى تستهلكها يوميًا ، وقدرها 1800 Cal ، فما هو الارتفاع الناتج فى درجة حرارة جسمها . اعتبر أن السعة الحرارية النوعية لجسم الفتاة 0.83 cal/g. C° . **الإجابة** : 36 C° .

8-11 التمدد الحرارى

رأينا أن درجة حرارة المادة مقياس للطاقة الكامنة فى جزيئاتها . وعند رفع درجة حرارة سائل أو جامد تزداد طاقة جزيئاته ، وبالتالى تزداد سعة اهتزازها . ونتيجة لهذه الزيادة فى سعة اهتزاز الجزيئات سوف يزداد متوسط المسافة بين كل جزئ والجزيئات المجاورة . أى أن السائل أو الجامد يتمدد عند رفع درجة حرارته . وبالرغم من وجود بعض الاستثناءات الواضحة من هذه القاعدة فى مدى صغير من درجات الحرارة (فالماء على سبيل المثال ينكمش* عند رفع درجة حرارته من 0°C إلى 4°C) . فإن المواد عمومًا تتمدد بزيادة درجة الحرارة ، بشرط عدم حدوث تغير فى الطور .

* فى حالة الماء تسبب الرابطة الهيدروجينية تجمع الجزيئات فى مجموعات لكل منها تركيب محدد حتى فوق درجة انصهار الثلج . وبارتفاع درجة الحرارة تتفكك هذه المجموعات مما يؤدى إلى ترتيب أكثر تضامًا للجزيئات .



يجب الفصل بين حواف بلاطات الشوارع الخرسانية باستخدام وصلات تمددية حتى يسمح لها بالتمدد تجاه بعضها البعض دون أن تنبعج عند ارتفاع درجة الحرارة .



سببت درجات الحرارة العالية جدًا تمدد هذه القضبان تمددًا كبيرًا يزيد كثيرًا عن حجم الثغرات التمددية بين المقاطع . ونتيجة لذلك انبعجت القضبان جانبًا مما أدى إلى خروج القطار عن الخط .

من الواضح أن التمدد الحرارى للمعدن فى بناية أو قنطرة يمكن أن يكون أمرًا ذا أهمية عملية كبيرة . فإذا لم يؤخذ التمدد الحرارى فى الاعتبار فإن قضبان السلك الحديدية والطرق الخرسانية السريعة سوف تنبعج تحت تأثير حرارة الشمس فى الصيف . وعليه فإن من الضرورى أن نعرف بدقة كيف تتمدد المادة مع درجة الحرارة .

لنفرض أن درجة حرارة قضيب طوله الابتدائى L_0 قد تغيرت بمقدار ΔT . فإذا كانت ΔL تمثل التغير الناتج فى طول القضيب ، فإن التغير النسبى فى الطول سيكون $\Delta L/L_0$. وقد وجد عمليًا ـ لمعظم الجوامد ـ أن التغير النسبى فى الطول يتناسب خطيًا مع تغير درجة الحرارة فى مدى معين من درجات الحرارة . ولوصف التمدد الحرارى فى هذه الحالة يمكننا تعريف **معامل التمدد الحرارى الطولى** α للمادة بالمعادلة :

$$\alpha = \frac{\text{التغير النسبى فى الطول}}{\text{التغير فى درجة الحرارة}} = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T}$$

التى يمكن كتابتها على الصورة :

$$\Delta L = \alpha L_0 \, \Delta T \qquad (11\text{-}4)$$

من الواضح أن وحدات α ، طبقًا للتعريف ، هى وحدات مقلوب درجة الحرارة ، أى 1/°C أو 1/K ؛ ويمكنك أن تجد القيم النموذجية لمعامل التمدد الطولى α لبعض المواد فى الجدول 3–11 .

وكمثال لاستخدام معامل التمدد الطولى ، لنفرض أن درجة حرارة قضيب من النحاس الأصفر طوله 75 cm قد تغيرت بمقدار +50°C . عندئذ ستكون الزيادة فى طول القضيب (استخرج قيمة α من الجدول 3–11) :

$$\Delta L = \alpha L_0 \, \Delta T = (19 \times 10^{-6} / \mathrm{C}°)(0.75 \ \mathrm{m})(50 \ \mathrm{C}°) = 7.1 \times 10^{-4} \ \mathrm{m}$$

جدول 3-11 معامل التمدد الطولى والحجمى لبعض المواد
(لكل درجة سيليزية عند 20°C)

المادة	$\alpha \times 10^6$	$\gamma \times 10^6$
ماس	1.2	3.5
زجاج (مقاوم للحرارة)	~3	~9
زجاج (رخو)	~9	~27
حديد وصلب	12	36
قرميد وخرسانة	~10	~30
نحاس أصفر	19	57
ألنيوم	25	75
زئبق		182
مطاط	~80	~240
جلسرين		500
جازولين (وقود البنزين)		~950
ميثانول (كحول ميثيلى)		1200
بنزين (عطرى)		1240
أسيتون		1490

وحيث أن هذا التغير فى الطول صغير جدًا ، فإن قيمة L_0 المستخدمة لتعيين ΔL ليست حساسة لدرجة الحرارة بدرجة كبيرة كافية لأن نهتم كثيرًا بدرجة الحرارة التى يقاس عندها . ولكن الحقيقة أن α يتغيرا تغيرًا طفيفًا مع درجة الحرارة ، ولذلك يجب استخدام القيمة المناسبة لكل مدى معين من درجات الحرارة فى الحسابات عالية الدقة . ومع ذلك فإن من النادر أن يكون لهذا التعقيد أية أهمية فى التطبيقات العملية .

هناك نظير مفيد للتمدد الحرارى وهو التكبير الفوتوغرافى . ففى كلتا الحالتين نجد أن كل بعد طولى للجسم يعانى نفس التغير النسبى كغيره من الأبعاد ، بما فى ذلك الثقوب الموجودة بالمادة . ويستخلص من ذلك أن محيط الثقب سوف يتغير فى الطول بنفس المقدار سواء كان مليئًا بالمادة أو فارغًا . وعليه فإن الزيادة فى درجة الحرارة تسبب **تمدد** الثقوب ، وليس انكماشها .

يعتبر التمدد الحجمى للمادة ظاهرة هامة أيضًا ، وخاصة فى حالة السوائل . وقياسًا على الطريقة السابق استخدامها فى تعريف معامل التمدد الطولى ، يمكن تعريف **معامل التمدد الحرارى والحجمى** γ بأنه التغير النسبى فى الحجم نتيجة لتغير درجة الحرارة بمقدار يساوى الوحدة :

$$\gamma = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$$

ومنه نجد مباشرة أن :

$$\Delta V = \gamma V_0 \, \Delta T \qquad (11\text{-}5)$$

وبالمثل ، فإن وحدات γ هى وحدات مقلوب درجة الحرارة . وكمثال لتطبيق هذه المعادلة ، افترض أن $100\ cm^3$ من البنزين قد سخنت من درجة $20°C$ إلى $25°C$. إذن ، طبقًا للمعادلة 5-11 ، سنجد أن التغير فى حجم هذه الكمية من البنزين يساوى (استخرج قيمة γ من الجدول 3-11) :

$$\Delta V = (1.24 \times 10^{-3}\ /C°)(100\ cm^3)(5\ C°) = 0.62\ cm^3$$

وهذا التغير فى الحجم يمثل 0.6 فى المائة من الحجم الأصلى ، وهو تغير كبير فى V فى كثير من التطبيقات . من الضرورى إذن تحديد درجة الحرارة المقاس عندها V إذا أريد استخدام قيم γ المدرجة بالجدول 3-11 . لاحظ أن القيم المعطاة تمثل γ عند $T = 20°C$. وبالطبع يمكن حساب ΔV نتيجة للتغيرات الصغيرة فى درجة الحرارة التى لا تبعد كثيرًا عن $20°C$ بدقة كبيرة باستخدام قيمة V المقاسة عند أى درجة حرارة واقعة فى هذا المدى الصغير .

يبين الجدول 3-11 أن معامل التمدد الطولى للجوامد يساوى ثلث معامل التمدد الحجمى تقريبًا ، وهذه قاعدة عامة للجوامد التى تتمدد بنفس القدر فى مختلف الاتجاهات . هذا وسوف يطلب منك فى المسالة 52 إثبات صحة هذه القاعدة باستخدام تعريفى α و γ .

مثال 6-11 :

يراد رصف طريق سريع بالبلاطات الخرسانية المرصوصة جنبًا إلى جنب ، والتى يبلغ طول الواحدة منها $20\ m$. ما هو اتساع الثغرة الواجب تركها بين كل بلاطتين متجاورتين عند درجة $-20°C$ بحيث لا تنبعج هذه البلاطات عندما تصل درجة الحرارة إلى $+50°C$ ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما شرط « عدم الانبعاج » ؟

الإجابة : لا يمكن أن تنبعج البلاطات إلا بعد ملامسها بعضها ببعض . وعليه فإن شرط « عدم الانبعاج » هو تلامس البلاطات بالكاد عند درجة الحرارة الأعلى .

سؤال : ما هى المعادلة الممكن استخدامها لتعيين مقدار تمدد البلاطة فى هذا المدى من درجات الحرارة ؟

الإجابة : $\Delta L = L_0\ \Delta T$ حيث $\Delta T = +70\ C°$.

سؤال : هل ΔL يساوى اتساع الثغر اللازم تركها بين كل بلاطتين متجاورتين ؟

الإجابة : لكى تتلامس بلاطتان متجاورتان يجب أن تتمدد كل منهما بمقدار يساوى **نصف** اتساع الثغرة الفاصلة بينهما . أى أن البلاطة الواحدة يمكنها أن تتمدد نصف اتساع الثغرة **فى كل جانب** ، وهذا يعنى أن مقدار التمدد الكلى للبلاطة يساوى اتساع الثغرة .

الحل والمناقشة : باستخراج قيمة α للخرسانة من الجدول 3-11 وتطبيق المعادلة (4-11) نجد أن :

$$\Delta L = (20\ m)(10 \times 10^{-6}\ /C°)(+70\ C°) = 0.014\ m = 1.4\ cm$$

مثال 7-11 :

ثنيت قطعة من سلك مصنوع من النحاس الأصفر طولها 1.000 m عند درجة 20°C فى صورة دائرة مع ترك ثغرة اتساعها 1 mm بين الطرفين . ماذا يحدث لاتساع الثغرة عندما ترتفع درجة حرارة السلك إلى 73°C ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما مقدار التغير فى الطول نتيجة لهذا الارتفاع فى درجة الحرارة ؟

الإجابة : باستخدام البيانات المعطاة بالجدول 3-11 :

$$\Delta L = (1.000\ m)(19 \times 10^{-6}/C°)(+53\ C°) = 1.0 \times 10^{-3}\ m = 1.0\ mm$$

سؤال : هل يعنى ذلك انغلاق الثغرة التى اتساعها 1 mm ؟

الإجابة : تذكر التماثل مع التكبير الفوتوغرافى الذى يفيدنا بأن اتساع الثغرة يزداد بنفس القدر النسبى (10^{-3}) كأى بعد طولى آخر . وهكذا فإن الزيادة فى اتساع الثغرة تساوى 10^{-3} mm .

سؤال : وبجانب هذا التماثل مع التكبير الفوتوغرافى ، كيف يمكن إثبات أن الثغرة سوف تزداد اتساعًا ؟

الإجابة : المحيط الأصلى للدائرة C يساوى 1.001 m وليس 1.000 m وعليه فإن الزيادة النسبية فى طول المحيط تكون $\Delta C/C_0 = 10^{-3}$ ، أى أن الطول الجديد لمحيط الدائرة هو :

$$C = C_0 + (0.001)C_0 = 1.001\ m + 0.001001\ m = 1.002001\ m$$

وهكذا فإن طول السلك يزداد بمقدار 1 mm ، ولكن محيط الدائرة التى يمثل السلك جزءًا منها يزداد بمقدار أكبر قليلاً من السلك . وقد عبرنا عن النتيجة النهائية بمثل هذا العدد الكبير من الأرقام المعنوية لتوضيح الزيادة فى C .

مثال 8-11 :

ملأ إناء من الزجاج الرخو حجمه 50.0 ml إلى حافته تمامًا بالبنزين عند درجة 0.0°C . هل ينسكب بعض البنزين من الإناء إذا ارتفعت درجة حرارته إلى 30.0°C ؟ وإذا حدث ذلك ، فما حجم الكمية المنسكبة منه ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف نعرف ما إذا كان بعض البنزين سوف ينسكب من الإناء أم لا ؟

الإجابة : الحجم الابتدائي لكل من الإناء والبنزين فيه متساويان (وهذا معنى « مملوء إلى الحافة ») ، كما أنهما يعانيان نفس التغير في درجة الحرارة ، ومن ثم فإن حجم كل منهما سوف يزداد نتيجة لارتفاع درجة الحرارة . فإذا كان معامل التمدد الحجمي في حالة البنزين أكبر منه في حال الزجاج الرخو ، فلن يتمكن الإناء من استيعاب كل البنزين في حجمه الجديد ، وبذلك ينسكب بعض البنزين من الوعاء .

سؤال : أى معاملى التمدد الحجمى أكبر من الآخر ؟

الإجابة : يوضح الجدول 3-11 أن معامل التمدد الحجمى للبنزين أكبر كثيراً من معامل التمدد الحجمى للزجاج الرخو . ومعنى ذلك أن بعض البنزين لابد أن يفيض من الإناء عند درجة الحرارة العالية .

سؤال : ما هى المعادلة اللازم استخدامها لإيجاد حجم البنزين المنسكب ؟

الإجابة : ΔV (للزجاج) - ΔV (للبنزين) = الحجم المنسكب

الحل والمناقشة : نحسب أولاً الزيادة فى حجم البنزين والإناء كلاً على حدة :

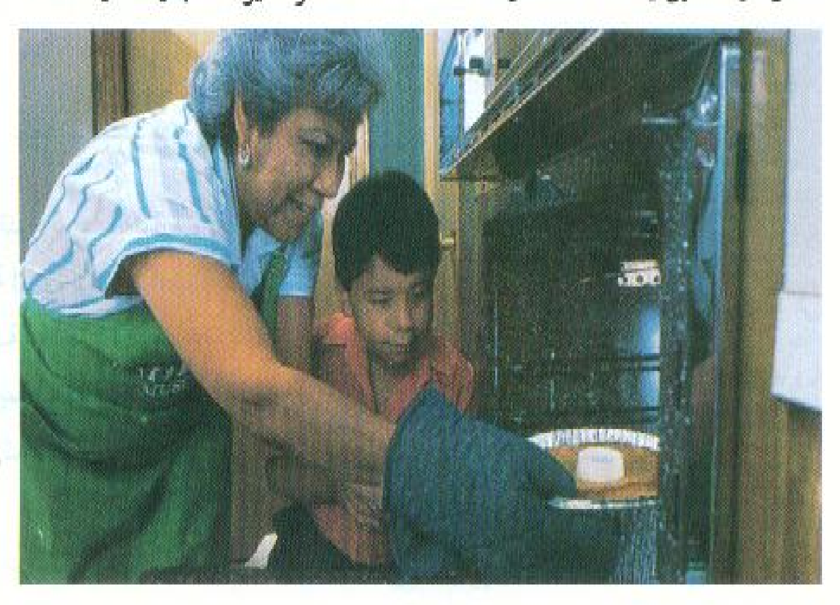
$$\Delta V \text{ (للزجاج)} = (50.0\ \text{ml})(27 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ)(+30.0\ \text{C}^\circ)$$
$$= 0.040\ \text{ml}$$

$$\Delta V \text{ (للبنزين)} = (50.0\ \text{ml})(1240 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ)(+30.0\ \text{C}^\circ)$$
$$= 1.86\ \text{ml}$$

وبالطرح نجد أن حجم البنزين المنسكب يساوى 1.82 ml .

11-9 إنتقال الحرارة : التوصيل

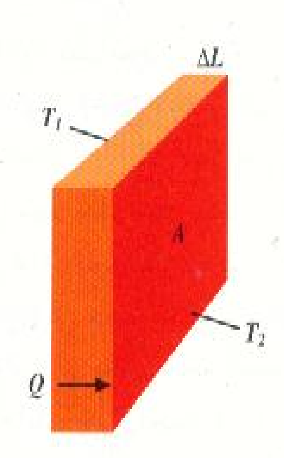
كلنا يعلم أنه إذا أمسك شخص يد ملعقة معدنية مغمورة فى ماء ساخن فإن الحرارة تنتقل من الماء إلى يد ذلك الشخص خلال مادة المعلقة ، وتفسير ذلك بسيط للغاية . ذلك



المواد رديئة التوصيل للحرارة لها تطبيقات عملية كثيرة .

أن الحرارة تدخل الملعقة من الماء الساخن ، ونتيجة لذلك تكتسب ذرات المادة في الجزء الساخن من الملعقة طاقة حرارية كبيرة . وبزيادة الطاقة الحرارية للذرات تزداد سعة اهتزازتها ، مما يؤدى إلى تصادمها بالذرات المجاورة الأكثر برودة ناقلة إليها الطاقة الحرارية . وهذه بدورها تتصادم مع الذرات التالية فتكسبها طاقة إضافية ، وهكذا ، وبهذه الطريقة تنتقل الطاقة الحرارية من الطرف الساخن للملعقة إلى الطرف البارد ، وفي نهاية الامر تصبح الملعقة كلها ساخنة . هذه الطريقة لانتقال الحرارة 0تسمى **التوصيل الحرارى** .

في عملية **التوصيل الحرارى** تنتقل الحرارة خلال المادة بواسطة التصادمات بين الذرات أو الجزيئات المتجاورة .



شكل 8-11:
تنساب الحرارة خلال الشريحة في الاتجاه المبين لأن $T_1 > T_2$.

يحدث التوصيل الحرارى بمعدلات مختلفة في المواد المختلفة . فالعصا الخشبية يمكن أن يحترق أحد طرفيها ؛ بينما يظل الطرف الآخر باردًا نسبيًا ، ولكن السكين أو الملعقة المعدنية ينقلان الحرارة بسرعة كبيرة من طرف إلى آخر . هذا يوضح أن قدرة المادة تعتمد على تركيبها الذرى فالفلزات على سبيل المثال تحتوى على العديد من الإلكترونات التي يمكنها الحركة بحرية كبيرة خلال المادة ، وبالتالى يمكنها أن تحمل الطاقة الحرارية أثناء حركتها من جزء إلى آخر في الفلز . ولهذا فإن الفلزات موصلات ممتازة للحرارة .

جدول 11-4 : الموصلية الحرارية* لبعض المواد المعروفة

المادة	k (W/K.m)+
فضة	430
نحاس	400
ألومنيوم	240
نحاس أصفر	105
خرسانة	0.8
زجاج	0.8
قرميد	0.6
ورق أسبستوس	0.2
مطاط	0.2
خشب	0.08
عظم	0.042
العضل	0.042
صوف زجاجي (ألياف زجاجية)	0.04
بلاستيك رغوى	0.03
دهن	0.021

* هذه هي القيم التقريبية لأن k يعتمد إلى حد ما على درجة الحرارة .

+ 1 W/K.m = (1/418.4)(cal/s)/C°/cm = 6.94 Btu.in/h.ft² . F°

سوف نستخدم التجربة الموضحة بالشكل 8-11 في استنتاج العلاقة الرياضية التي تصف التوصيل الحرارى وصفًا كميًا . هذا الشكل يمثل شريحة من المادة سمكها ΔL ومساحة كل من وجهيها A ؛ ولنفرض أن الفرق بين درجتي حرارة هذين الوجهين $T_1 - T_2 = \Delta T$. من الطبيعي أن معدل سريان الحرارة $Q/\Delta t$ خلال الشريحة لابد أن يعتمد على كل من ΔT و A و ΔL . ومن المعقول أن نفترض أن معدل سريان الحرارة يتناسب طرديًا مع كل من ΔT و A (أى يزيد بزيادة ΔT أو A أو كليهما) وعكسيًا مع ΔL (أى يقل بزيادة ΔL) ، وقد تبين أن جميع هذه الافتراضات صحيحة ، إذ ثبت بالتجربة أن :

$$\frac{Q}{\Delta t} = k\frac{A\Delta T}{\Delta L} \quad (11\text{-}6)$$

حيث تسمى الكمية $\Delta T/\Delta L$ عادة باسم **تدرج درجة الحرارة** ، كما يعرف الثابت k ، الذى يعتمد على مادة الشريحة ، **بالموصلية الحرارية** للمادة . ويمثل الجدول 4-11 القيم النمطية للثابت k لبعض المواد المعروفة عندما يكون $Q/\Delta T$ مقدرًا بالواط و A بالمتر المربع ، ΔL بالمتر ، ΔT بالكلفن . ويمكنك أن تلاحظ من هذا الجدول أن k يكون كبيرًا بالنسبة للموصلات الحرارية الجيدة كالفلزات وصغيرًا في حالة الموصلات الحرارية الرديئة والتي تعرف **بالعوازل** .

يتحدد إحساس الإنسان بمدى حرارة (أو برودة) جسم ما عند لمسه بالموصلية

الحرارية لهذا الجسم . فالمعدن الساخن مثلا يمكنه أن يحرق يدك بسهولة لأن الحرارة تنساب بسهولة كبيرة منه إلى يدك . أما إذا لمست قطعة من الخشب عند نفس درجة الحرارة فإنها لا تحرق يدك بنفس الدرجة من السوء . فنظرًا لأن الموصلية الحرارية للخشب أصغر كثيرًا مما فى حالة المعادن ، فإن الطاقة الحرارية تنساب بسهولة إلى يدك عند نقطة التلامس فقط ، بمعنى أن يدك تبرد الخشب بسرعة عند نقطة التلامس فقط .
هل يمكنك أن تفسر مسترشدًا بنفس هذا المنطق لماذا تبدو الأرضية الباردة المبلطة بالرخام أكثر دفئًا بالنسبة لقدميك العاريتين عندما تقف على سجادة مفروشة فوقها ؟

مثال 9-11 :

مبرد للمشروبات الخفيفة على هيئة صندوق مكعب الشكل أبعاده الداخلية هى 30 × 30 × 30 cm . هذا المبرد مصنوع من مادة بلاستيكية موصلتها الحرارية k = 0.032 W/K.m . وضعت كمية من الثلج فى المبرد ، وبعد فترة زمنية صغيرة استقرت درجة الحرارة داخله عند 0°C . ما هى كمية الثلج المنصهر فى الساعة ، إذا كانت درجة الحرارة خارج المبرد 25°C ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد كمية الثلج المنصهرة ؟
الإجابة : كمية الحرارة التى تنساب إلى داخل المبرد فى الساعة ، علمًا بأن كل 80 cal تسبب انصهار 1.0 g من الثلج .
سؤال : بماذا يتعين معدل انسياب الحرارة إلى داخل المبرد ؟
الإجابة : يتعين هذا المعدل بثلاث كميات :
1 ـ تدرج درجة الحرارة $\Delta T / \Delta L$ بين داخل وخارج المبرد .
2 ـ مساحة جدار المبرد .
3 ـ الموصلية الحرارية للبلاستيك .
سؤال : ما هى معادلة معدل انسياب الحرارة ؟
الإجابة : المعادلة 6-11 تعطينا : $\frac{Q}{\Delta t} = kA\frac{\Delta T}{\Delta L}$
سؤال : ما هى المساحة التى يجب استخدامها ؟
الإجابة : المبرد له ستة جوانب مساحة كل منها $(0.30\text{ m})(0.30\text{ m}) = 0.090\text{ m}^2$ ، وبذلك تكون المساحة الكلية 0.54 m^2 .

الحل والمناقشة : حساب معدل انسياب الحرارة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = (0.032\text{ W/K.m})(0.54\text{ m}^2)(25\text{ K}/0.040\text{ m}) = 11\text{ W}$$

$$= (11\text{ J/s})(1.0\text{ cal}/4.184\text{ J}) = 2.6\text{ cal/s}$$

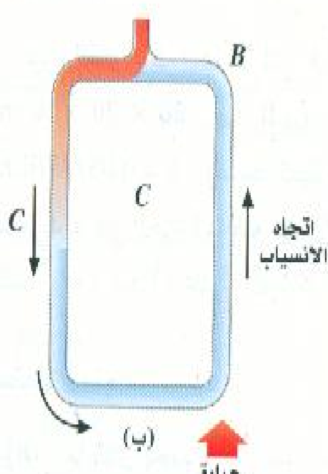
إذن ، فى كل 1 h تنساب إلى داخل المبرد كمية من الحرارة قدرها 9300 cal = 3600(2.6)
وهذه تكفى لصهر كمية من الثلج كتلتها :

$$\frac{9300\ \text{cal}}{80\ \text{cal/g}} = 120\ \text{g}$$

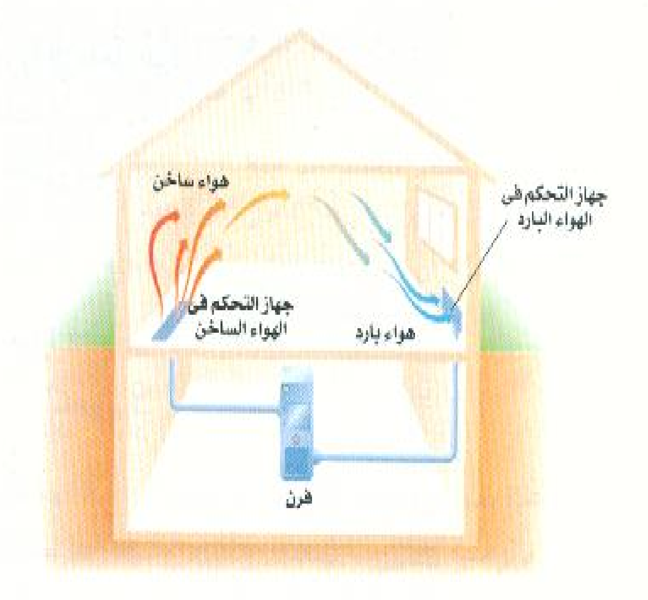
11-10 انتقال الحرارة : الحمل

يمثل الشكل 9-11 تجربة بسيطة توضح ظاهرة الحمل . فإذا ملأنا الأنبوبة الزجاجية المبينة فى الشكل بالماء ، ثم وضعنا قليلاً من الصبغة الملونة قرب رقبتها فإنها تظل ساكنة تقريبًا فى مكانها (الجزء أ) . ولكن عند تسخين الأنبوبة عند أحد الأركان كما هو مبين بالجزء (ب) ، سوف يبدأ السائل فى الانسياب فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة حاملاً الصبغة معه .

والسبب فى هذه الحركة بسيط جدًا . فنظرًا لأن السائل أو الغاز يتمدد بارتفاع درجة حرارته ، فإن الماء الموجود فى الركن السفلى الأيمن عند A سوف يتمدد عند تسخينه ليصبح أقل كثافة من باقى السائل . ولهذا فإن العمود الأيمن من السائل الأقل كثافة لن يستطيع الاستمرار فى حمل العمود الأيسر الأكبر كثافة ولهذا السبب سوف يهبط العمود الأيسر فى الأنبوبة ، وينساب السائل نتيجة لذلك إلى أعلى فى الجانب الأيمن . وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة بالحمل .



شكل 9-11:
تبين الصبغة أن السائل يدور فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة عند تسخين السائل فى الموضع A . وفى هذه الحالة تنتقل الحرارة بواسطة السائل أثناء الدوران فى عملية تسمى الحمل .



شكل 10-11 :
فى عملية الحمل يقوم المائع بنقل الحرارة من مكان إلى آخر . والمائع المستخدم فى نظام تدفئة هذا المنزل هو الهواء .

تنتقل الحرارة من مكان إلى آخر فى عملية الحمل بواسطة تيارات الموائع .

رأينا فى القسم السابق أن التوصيل لا يتضمن حركة الجزيئات لمسافات كبيرة ، إذ تنتقل الحرارة من جزئ إلى آخر بالتصادم . أما فى الحمل فإن جزيئات المادة الناقلة للحرارة هى التى تتحرك من مكان إلى آخر ناقلة الحرارة معها . والسوائل والغازات

وحدها هى التى يمكنها أن تنقل الحرارة بالحمل لأن جزيئات هذه المواد فقط هى التى تستطيع أن تتحرك لمسافات كبيرة .

يدفأ الكثير من المنازل بواسطة الحمل الهوائى . والواقع أن الحركة الدورانية للهواء تكون دائمًا محسوسة بدرجة كبيرة حتى فى أنظمة التدفئة التى لا تحتوى على مراوح . فمثلاً ، إذا وقف شخص قرب جهاز التحكم فى خروج الهواء الساخن من الفرن الهوائى فإنه سيلاحظ اندفاع الهواء الساخن بوضوح من جهاز التحكم . ولكى تتم دورة الحمل دون اضطراب ، يجب أن يسمح تصميم أنظمة التدفئة بالحمل الهوائى للهواء البارد أن يعود إلى الفرن لتسخينه مرة أخرى ؛ تمامًا كما يعود السائل فى دورة الحمل إلى النقطة A فى الشكل 9-11ب ، وهذا هو الغرض من استخدام أجهزة التحكم فى الهواء البارد فى مثل هذه الأنظمة .

وتنشأ الظواهر الجوية جزئيًا نتيجة لتيارات الحمل الهوائية ، وتعتبر تيارات الحمل الهوائية قرب حواف السلاسل الجبلية ذات أهمية خاصة فى هذا الشأن . ففى أوقات محددة مختلفة يوميًا تلاحظ تأثيرات كبيرة فى الطقس نتيجة لهبوط الهواء البارد من أعالى الجبال مما يعمل على رفع الهواء الدافئ فى السهولة القريبة إلى أعلى ، وهذا يساعد على تلطيف الجو بدرجة ملحوظة . كذلك فإن تيار الخليج وتيار اليابان يعتبران مثالين هامين آخرين لانتقال الحرارة بالحمل على نطاق واسع .



غالبًا ما يكون انتقال الحرارة بالحمل فى الجو مضطربًا وعنيفًا .

11-11 انتقال الحرارة : الإشعاع

كلنا نعلم أن الشمس تدفأ الأرض ، وأنها فى الحقيقة مصدرنا الأساسى للحرارة . ويمكننا أن نرى بسهولة أن الحرارة التى تصل إلينا من الشمس لا تنتقل إلينا بالتوصيل أو الحمل ، لأن الفراغ الهائل بيننا وبين الشمس لا يحتوى على أية جزيئات تقريبًا .

وبناء على ذلك فإن الانتقال الاهتزازى بالتوصيل أو الانتقال الدورانى بالحمل يصبحان مستحيلين . ومن ثم فإن هذه الحالة هي حالة انتقال للحرارة خلال الفراغ ، أى خلال الفضاء الخالى . هذه الطريقة لانتقال الحرارة تسمى **الإشعاع** .

سوف نرى عند دراستنا للكهرباء والمغناطيسية أن الإشعاع طاقة في صورة موجات كهرومغناطيسية تنتقل في الفراغ بسرعة الضوء . هذا وينبعث الإشعاع من جميع الأجسام ، ولكن معظم هذا الإشعاع يكون إشعاعًا **تحت أحمر** عند درجات الحرارة العادية . كذلك فإن الإشعاع دون الأحمر يمتص امتصاصًا شديدًا بواسطة جزيئات الماء ، بما فى ذلك الجزيئات الموجودة فى خلايا الجسم . فمثلاً ، عندما يحس الإنسان بالدفء عند تعرضه للإشعاع دون الأحمر المنبعث من سخان كهربائى ، فإن ذلك يحدث نتيجة لتحول هذا الإشعاع إلى حرارة عند امتصاصه فى الجسم . وبالرغم من أن الإشعاع دون الأحمر يسمى أحيانًا بالإشعاع الحرارى ، فإن من الخطأ اعتبار أن الإشعاع دون الأحمر حرارة إلا بعد تحول الطاقة إلى حرارة فى عملية امتصاص كالسابق الإشارة إليها .

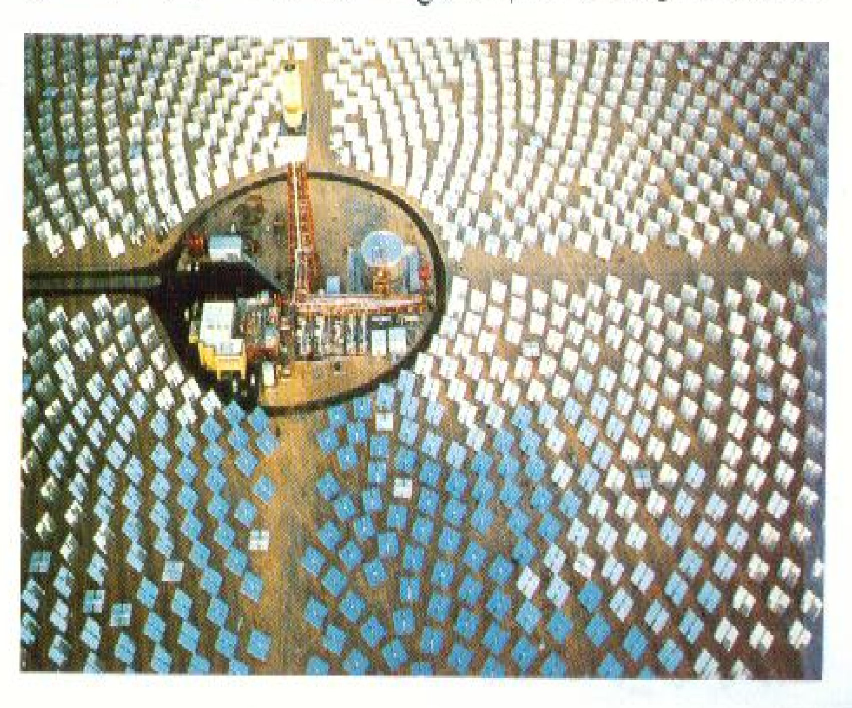
يعتمد معدل إنبعاث الطاقة الإشعاعية من الأجسام اعتمادًا شديدًا على درجة حرارتها ، كما يعتمد أيضًا على مساحة سطح الجسم المشع وطبيعة هذا السطح . هذا ما يلخصه أحد مبادئ الفيزياء المعروف باسم **قانون ستيفان** . وطبقًا لهذا القانون تعطى الطاقة الإشعاعية المنبعثة ، الجسم لكل ثانية بالعلاقة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4 \qquad (11-7)$$

حيث A المساحة السطحية للجسم ، T درجة حرارته المطلقة . ويعرف الثابت σ **بثابت ستيفان بولتزمان** ، وقيمته العددية كالتالى :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2 . K^4$$

أما المعامل e فيسمى **ابتعاثية** الجسم ، وتتراوح قيمته بين 0 و 1 . هذا وتتوقف قيمة e على



تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية فى محطة الشمس رقم واحد « solar one » فى بارستو ، كاليفورنيا . تركز كل هذه المرايا ضوء الشمس تركيزًا بؤريًا على المجمع المثبت فى قمة البرج حيث تستغل الحرارة المتجمعة فى تسخين بخار الماء إلى درجات حرارة عالية جدًا . وبعدئذ يستخدم هذا البخار فى تشغيل التوربينات المتصلة بالمولدات الكهربائية .

طبيعة السطح المشع ، فإذا كان السطح داكنًا خشنًا فإن ابتعاثيته تكون قريبة من 1 ، بينما تقترب قيمة e من الصفر عندما يكون السطح ناصعًا لامعًا . ففى حالة النحاس المصقول مثلاً فإن e تساوى حوالى 0.3 . وإذا كانت $e = 1.00$ يقال أن الجسم منبعث « مثالى » ، وهذا ما يعرف عادة **بالجسم الأسود** . وكقاعدة عامة يمكن القول أن المبتعثات الجيدة ممتصات جيدة .

هذه النقطة الأخيرة تمكننا من مناقشة صافى امتصاص أو فقد الطاقة الإشعاعية بين جسم والوسط المحيط به ، فإذا وضع جسم فى وسط محيط درجة حرارته T_s فإنه سوف يمتص الطاقة الإشعاعية بمعدل قدره :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{abs} = e\sigma A T_s^4$$

وإذا كانت درجة حرارة الجسم T ، فإنه سوف يبتعث الطاقة فى نفس الوقت بمعدل قدره :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{emit} = e\sigma A T^4$$

وعليه ، فإن معدل امتصاص الجسم للطاقة أو فقده لها يساوى الفرق بين $(Q/\Delta t)_{abs}$ و $(Q/\Delta t)_{emit}$:

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{net} = e\sigma A(T^4 - T_s^4)$$

فإذا كانت $T > T_s$ سيكون هناك فقد صاف فى الطاقة وبذلك يبرد الجسم . أما إذا كانت $T < T_s$ سيكون هناك كسب صاف للطاقة وبذلك يسخن الجسم . ومن الطبيعى أن الجسم قد يكتسب أو يفقد الطاقة فى نفس الوقت بالتوصيل أو الحمل أو كليهما معًا .

مثال 11-10 :

درجة حرارة سطح الشمس تساوى 6000 K تقريبًا . احسب القدرة الكلية المشعة من سطح الشمس بفرض أن الشمس كرة نصف قطرها 7×10^8 m ، وأن ابتعاثية الشمس 0.95 .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى الخواص الفيزيائية اللازمة لتعيين القدرة المشعة من أى جسم ؟

الإجابة : مساحة سطح الجسم ودرجة الحرارة والابتعاثية .

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى يعطى المعادلة التى تربط بين هذه الكميات ؟

الإجابة : قانون ستيفان ، وهو :

$$\frac{Q}{\Delta t} = P = e\sigma A T^4$$

سؤال : كيف نوجد المساحة السطحية للشمس ؟

الإجابة : فى حالة الكرة ، $A = 4\pi R^2$.

الحل والمناقشة : مساحة سطح الشمس هي :

$$A = 4\pi(7\times10^{8}\ m)^2 = 6\times10^{18}\ m^2$$

وعليه فإن القدرة المشعة تكون :

$$P = (5.67\times10^{-8}\ W/m^2 . K^4)(0.93)(6\times10^{18}\ m^2)(6000\ K)^4$$
$$= 4\times10^{26}\ W$$

ومن الواضح أن قيمة هذه القدرة هائلة جدًا ، كما هو متوقع . وهذا يرجع إلى كبر حجم الشمس ودرجة حرارتها العالية .

تمرين : أوجد القدرة المشعة لكل متر مربع من سطح الشمس . هذه القيمة واحدة لأى جسم له نفس الابتعاثية عند درجة 6000 K . **الإجابة :** $70\ MW/m^2$.

11-12 العزل الحرارى للمبانى

العزل الحرارى موضوع هام لكل من عليه أن يدفع فواتير تدفئة أو تبريد منزله وبنظرة سريعة إلى الجدول 4-11 يمكننا أن نرى أن المعادن أسوأ العوازل وأن البلاستيك الرغوى من أحسنها . ولهذا يستخدم البلاستيك الرغوى ، وكذلك الصوف الزجاجى (الألياف الزجاجية) ، على نطاق واسع فى العزل الحرارى لمعظم المبانى الحديثة . هذه المواد عوازل جيدة جدًا لأنها تحبس الهواء فيها ، والهواء واحد من أفضل العوازل . ونظرًا لأن الهواء فى حد ذاته يمكنه أن ينقل الحرارة بالحمل ، فإن قيمته الحقيقية كعازل حرارى تتجلى واضحة عند منعه من الحركة حينما يكون محبوسًا فى مواد مسامية كالصوف الزجاجى .



يجب عزل المبانى عزلاً حراريًا جيدًا سواء كان المناخ حارًا أو باردًا لكى يقل التبادل الحرارى بين داخل المبنى وخارجه إلى الحد الأدنى . هذا يساعد على تنظيم درجة الحرارة بالداخل وتوفير استهلاك الوقود اللازم لأجهزة التدفئة أو التبريد .

وفى الأبنية الحديثة تتكون الحوائط عادة من طبقات عديدة متوازية . فإذا افترضنا أن لدينا حائطًا مكونًا من ثلاث طبقات موصلياتها الحرارية k_1 ، k_2 ، k_3 وسُمُوكها L_1 ، L_2 ، L_3 ، فإن معدل انسياب الحرارة خلال هذا الحائط سيكون :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{(L_1/k_1)+(L_2/k_2)+(L_3/k_3)}$$

حيث ΔT الفرق بين درجتى حرارة سطحى الحائط . لاحظ أن عدد الحدود فى مقام الطرف الأيمن يساوى عدد الطبقات فى الحائط . وتعتبر الكميات R_1/k_1 وأمثالها مقاييس لمقاومة مختلف الطبقات لانسياب الحرارة خلال الطبقة ، ويعرف كل منها بالقيمة R للطبقة المعنية . فإذا كان الحائط مكونًا من N طبقة ، يمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة القيم R على الصورة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R_1+R_2+....+R_N} = \frac{A\Delta T}{R_{tot}} \qquad (11\text{-}8)$$

ويحتوى الجدول 5-11 على القيم R للمواد المستخدمة فى العزل الحرارى للمبانى

بالوحدات SI وأيضًا بالوحدات البريطانية $ft^2 . °F . h/Btu$ لأنها تستخدم كثيرًا فى هذا المجال ؛ حيث $1\ ft^2 . °F . h/Btu = 0.176\ m^2 . K/W$.

ولكى نرى مدى فائدة القيم R ، لنفرض أن لدينا حائطًا مكونًا من ثلاث طبقات مواصفاتها كالتالى : 2.00 cm من الخشب ، 9.0 cm من الصوف الزجاجى ، 1.0 cm من ألواح الجبس . وحيث أن القيمة R الكلية هى مجموعة القيم R لهذه المواد الثلاثة ، سنجد من الجدول 5–11 أن :

$$R_{tot} = 0.185 + 1.95 + 0.06 = 2.20\ m^2 . K/W$$

جدول 4–11 العامل R بالتقريب لبعض المواد

المادة	السمك (cm)	$R(m^2.K/W)$	$R(ft^2.°F.h/Btu)$
خشب مصمت	2.00	0.185	1.05
خشب أبلكاج	1.30	0.111	0.63
فبر (عازل)	1.90	0.370	2.1
ألواح الجبس	1.00	0.060	0.34
سجادة زائد بطانة	.....	0.35	2.0
أسفلت	.....	0.070	0.4
أسفلت (مصبوب)	20	0.11	0.64
قالب أسفلتى :			
عادى	20	0.20	1.1
خفيف	20	0.35	2.0
صوف زجاجى (ألياف زجاجية)	2.5	0.65	3.7
	9.0	1.95	11
	15.0	3.3	19
شباك (بلوح زجاجى فردى)	.....	0.18	1
شباك (بلوح زجاجى مزدوج)	.....	0.35	2

وباستخدام القيمة R الكلية السابقة فى المعادلة 8–11 يمكن حساب معدل انسياب الحرارة عبر الحائط . لاحظ أن الجزء الأعظم من المقاومة الحرارية للحائط ترجع إلى طبقة الصوف الزجاجى العازلة .

مثال توضيحى 3–11

وجدنا أن القيمة R للحائط السابق تساوى $2.20\ m^2 . K/W$. فإذا كانت مساحة هذا الحائط $5.0 \times 3.0\ m^2$ ، فما هى كمية الحرارة المفقودة كل ساعة عندما تكون درجة الحرارة بالداخل 20°C وبالخارج -10°C ؟

استدلال منطقى : يعطى معدل فقد الحرارة بالتوصيل كالآتى :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{A\Delta T}{R_{tot}}$$

$$= \frac{(15\ m^2)(30\ K)}{(220\ m^2.K/W)} = 200\ W = 200\ J/s$$

وفى الساعة الواحدة تكون : $\Delta t = 3600\ s$ إذن :

$$Q = (200\ J/s)(3600\ s) = 7.2 \times 10^5\ J$$

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الحرارة والطاقة الحرارية ، (ب) الاتزان الحرارى والقانون الصفرى للديناميكا الحرارية ، (جـ) السعر والسعر الكبير والوحدة الحرارية البريطانية ، (د) السعة الحرارية النوعية ،(هـ) حرارة التبخير وحرارة الانصهار ، (و) تغير الطور ، (ز) رسم بيان الطور ، (ح) المسعر ، (ط) معامل التمدد الحرارى ، (ى) التوصيل الحرارى ، (ك) الحمل الحرارى ، (ل) الإشعاع الحرارى ، (م) قانون ستيفان ، (ن) الموصلية الحرارية والعامل R ، (س) النقطة الثلاثية ، (ع) منحنى الانصهار ، (ف) منحنى التبخير ، (ص) منحنى التسامى .

2 ـ شرح كيف يمكننا القانون الصفرى من قياس درجة الحرارة .

3 ـ استخدام المعادلة $Q = mc\Delta T$ لحل المسائل البسيطة فى قياس كمية الحرارة .

4 ـ شرح لماذا يؤدى التبخر إلى تبريد السائل .

5 ـ شرح لماذا تتغير نقطة غليان السائل مع تغير الضغط على السائل .

6 ـ استخدام رسم بيان الطور لتفسير التغيرات الطورية لمادة واعتماد هذه التغيرات الطورية على الضغط ودرجة الحرارة .

7 ـ وصف كيفية تغير درجة حرارة مادة بلورية عند تسخينها ببطء وانصهارها ثم تسخينها أكثر من ذلك ثم تبخرها .

8 ـ حل المسائل المتعلقة بحرارتى الانصهار والتبخير فى الكالوريمترية . وشرح لماذا يعتبر قانون بقاء الطاقة المبدأ الأساسى للحل .

9 ـ استخدام معاملى التمدد الحرارى فى المواقف البسيطة .

10 ـ تعيين كمية الحرارة المنسابة خلال شريحة من مادة بمعلومية درجتى حرارة سطحى الشريحة .

11 ـ تعيين معدل إشعاع الطاقة من جسم ما .

12 ـ إيجاد العامل R لتعيين معدل انسياب الحرارة خلال حائط مكون من عدة طبقات .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

المكافئ الميكانيكى للحرارة

1 calorie = 4.184 J

ثابت ستيفان ـ بولتزمان

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ w/M^2 . K^4$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الحرارة :

هى الطاقة التى تنتقل من جسم ساخن إلى آخر بارد نتيجة للفرق بين درجتى حرارتهما .

الاتزان الحرارى :

يقال لجسمين أنهما فى حالة اتزان حرارى إذا تساوت درجتا حرارتهما . عندما يتلامس جسمان فى حالة اتزان حرارى لا يحدث أى تبادل حرارى بينهما .

القانون الصفرى للديناميكا الحرارية :

إذا اتزن جسمان كل على حدة اتزانًا حراريًا مع جسم ثالث فإنهما يكونان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآخر .

الطاقة الحرارية :

الطاقة الحرارية هى الطاقة المرتبطة بالحركات العشوائية لجزيئات وذرات المادة .

السعة الحرارية النوعية (c) :

السعة الحرارية النوعية لمادة تربط كمية الحرارة التى تكتسبها المادة أو تفقدها بالتغير الناتج فى درجة الحرارة .

$$Q = mc\Delta T$$

حرارة التبخير وحرارة الانصهار :

حرارة التبخير (H_v) هى كمية الحرارة اللازمة لتغيير طور وحدة الكتلة من المادة من سائل إلى غاز .

$$Q = mH_v$$

حرارة الانصهار (H_f) هى كمية الحرارة اللازمة لتغيير طور ووحدة الكتلة من المادة من جامد إلى سائل

$$Q = mH_f$$

رسم بيان الطور :

رسم بيان الطور لمادة هو منحنى الضغط مقابل درجة الحرارة الذى يوضح قيم P و T التى تحدث عندها التغيرات الطورية للمادة . وفى هذا الرسم البيانى يفصل منحنى الانصهار بين الطورين السائل والصلب ، ويفصل منحنى التبخير بين الطورين السائل والغازى ، وأخيرًا يفصل منحنى التسامى بين الطورين الصلب والغازى .

النقطة الثلاثية :

النقطة الثلاثية لمادة هى قيمة الضغط ودرجة الحرارة التى تتواجد فيها الأطوار الثلاثة للمادة جميعًا فى حالة اتزان ، وهى نقطة تقاطع منحنيات الانصهار والتبخير والتسامى فى رسم بيان الطور .

معاملا التمدد الحرارى :

معامل التمدد الحرارى الطولى (α) هو النسبة بين التغير النسبى فى طول الجسم وفرق درجة الحرارة الذى يسبب هذا التغير .

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

معامل التمدد الحرارى الحجمى (γ) هو نسبة التغير النسبى فى حجم الجسم إلى فرق درجة الحرارة الذى يسبب هذا التغير .

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \Delta T$$

خلاصة :

1 ـ عند ثبوت ΔT ، يعانى كل بعد طولى أو عنصر حجمى من الجسم من نفس التغير النسبى ، تمامًا كما فى حالة التكبير الفوتوغرافى . هذا ينطبق أيضًا على الثقوب والفجوات الموجودة فى الجسم سواء بسواء .

انتقال الحرارة بالتوصيل :

معدل توصيل الحرارة خلال شريحة من المادة سمكها ΔL وساحتها السطحية A يعطى بالعلاقة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = kA\frac{\Delta T}{\Delta L}$$

حيث ΔT فرق درجة الحرارة بين وجهى الشريحة ، k الموصلية الحرارية لمادة الشريحة .

خلاصة :

1 ـ النسبة $\Delta T/\Delta L$ تعرف بتدرج درجة الحرارة عبر الشريحة .

2 ـ الطريقة البديلة لوصف التوصيل الحرارى تتضمن تعريف العامل R للمادة :

$$R = \frac{\Delta L}{k}$$

إذن :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R}$$

وتتضح ميزة استخدام العامل R عندما يتكون حائط من عدة طبقات من مواد ذات سُمُوك مختلفة . ويعطى معدل انسياب الحرارة خلال حائط طبقى بالعلاقة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R_{tot}}$$

حيث R_{tot} مجموع العوامل R للشرائح المختلفة المكونة للحائط .

انتقال الحرارة بالإشعاع :

يعتمد معدل فقد الجسم للطاقة الحرارية بالإشعاع على درجة الحرارة المطلقة للجسم ومساحة وطبيعة سطح الجسم :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{rad} = e\sigma AT^4$$

حيث e ابتعاثية السطح ، σ ثابت ستيفان ـ بولتزمان .

خلاصة :

1 ـ الابتعاثية عدد لا بعدى يتراوح من 0 إلى 1 ، ويعتمد على طبيعة سطح الجسم . وتكون الابتعاثية صغيرة فى حالة الأسطح المصقولة ذات العاكسية العالية ، وكبيرة فى حالة الأسطح الداكنة الخشنة .

2 ـ المبتعثات الجيدة (e قريبة من 1) ممتصات جيدة للإشعاع ، وابتعاثيتها تساوى امتصاصيتها . يعطى معدل امتصاص الجسم للطاقة الإشعاعية عند وجوده فى بيئة درجة حرارتها T_s بالعلاقة :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{abs} = e\sigma AT_s^4$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ لديك عينة من غاز الأكسجين O_2 كتلتها 10 g وأخرى من غاز الأرجون Ar كتلتها 10 g . أى هاتين العينيتين أكبر فى السعة الحرارية النوعية ؟

2 ـ أعطى طالب إبريق ترموس يحتوى على مادة مجهولة درجة حرارتها T_1 . وبعد إضافة كمية من الماء الساخن درجة حرارتها T_2 (حيث $T_2 > T_1$) لم تتغير درجة الحرارة داخل الإبريق بل ظلت ثابتة عند T_1 ، فاستنتج الطالب أن السعة الحرارية النوعية للمادة المجهولة تساوى ما لانهاية . اشرح لماذا تشير هذه التجربة إلى أن $c = \infty$. ما هو التفسير المحتمل لهذه النتائج العملية .

3 ـ هل يمكن أن تضاف الحرارة إلى شيء بدون أن تتغير درجة حرارته ؟ ماذا لو كان هذا « الشيء » غازًا ؟ سائلاً ؟ جامدًا ؟

4 ـ ينصهر نوع معين من الشمع عند درجة 60°C . صف تجربة يمكنك استخدامها لتعيين حرارة انصهاره .

5 ـ من الممكن أن تجعل الماء يغلى بشدة بتبريد زجاجة من الماء تم سدها عندما كان الماء يغلى عند درجة 100°C . اشرح .

6 ـ لماذا يبدو لنا أن قطعة من المعدن أبرد من قطعة من الخشب عند نفس درجة الحرارة ؟

7 ـ عندما يتوقع المزارعون أن درجات الحرارة ستكون أقل قليلاً من درجة التجمد فإنهم يقومون أحيانًا بحماية فواكههم وخضرواتهم بتنديتها بالماء . ما هو المبدأ الفيزيائي وراء هذا الإجراء ؟

8 ـ لماذا يكون الحرق الذى يسببه بخار الماء عند درجة 100°C أشد كثيرًا عادة من الحرق الناتج عن الماء عند درجة 100°C ؟

9 ـ تكون التقلبات فى درجة الحرارة فى الأراضى القريبة من المسطحات المائية الواسعة أقل بدرجة ملحوظة منها فى مراكز المناطق الأرضية الواسعة . اشرح .

10 ـ من المعروف أن الغرفة المكتظة بالناس تصبح حارة جدًا إذا لم يجر تهويتها بطريقة مناسبة . بفرض أن كل شخص يطلق من الحرارة كمية تكافئ السعرات الغذائية التى يحرقها خلال اليوم ، قدر الارتفاع فى درجة حرارة فصلك خلال 1 h إذا لم يكن هناك أى فقد للطاقة خارج الفصل .

11 ـ ما هى كمية الماء بالتقريب التى يجب أن تتبخر من سطح جلد رجل متوسط الحجم لكى يبرد جسمه بمقدار 1°C ؟ إلى أى مدى تتفق هذه النتيجة مع ما سمعته عن تأثير العرق على الجسم ؟ ($c_{body} = 0.83$ cal/g.°C) .

12 ـ إذا تعرض الثلج لضغط كبير فإن نقطة انصهاره تنخفض إلى ما دون 0°C ، ويمكننا أن نقول أن نقطة الانصهار تنخفض بمقدار 5°C تقريبًا لكل زيادة فى الضغط المطلق قدرها 6.0×10^7 Pa . قدر نقطة انصهار الثلج تحت مزلجة المتزلج على الثلج .

13 ـ قدر درجة حرارة سطح الشمس باستخدام الحقائق الآتية : القدرة الإشعاعية التى تصل من الشمس إلى الأرض لكل متر مربع تساوى 1340 J/m^2 ، نصف قطر الشمس 7×10^8 m ، بعد الشمس عن الأرض 1.5×10^{11} m .

مسائل

القسم 11-4

1 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) التى يجب إضافتها إلى 475 g من الماء لكى ترتفع درجة حرارته من 5°C إلى 30°C ؟

2 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) التى يجب انتزاعها من 1.65 g من الماء لتبريده من 73°C إلى 18°C ؟

3 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) التى يجب انتزاعها من 135 g من النحاس لكى تتغير درجة حرارته من 150°C إلى -25°C ؟

4 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) اللازمة لرفع درجة حرارة 2.80 kg من الألمنيوم من 29°C إلى 122°C ؟

الأقسام من 11-5 إلى 11-7

5 ـ ما هى كمية الحرارة المنطلقة من 25 g من بخار الإيثانول (الكحول الإيثيلى) عند تكثفها عند درجة 78°C ثم تبريدها إلى 15°C ؟

6 ـ ما هى كمية الحرارة اللازمة لتسخين 1.35 kg من الزئبق من درجة -12°C إلى 357°C ثم تبخيرها ؟

■ 7 ـ ما هى كمية الحرارة التى يجب انتزاعها من 275 g من بخار الماء عند درجة 100°C لكى تتكثف ثم تنخفض درجة حرارته لتصبح ثلجًا درجة حرارته النهائية -35°C ؟ افترض أن ضغط بخار الماء 1 atm .

8 ـ ما هي كمية الحرارة اللازم إضافتها إلى 240 g من الألمنيوم لتحويلها من الحالة الصلبة عند درجة 27°C إلى الحالة السائلة عند درجة 660°C ؟

▪ 9 ـ أسقط قالب من الثلج كتلته 26 g ودرجة حرارته −10°C في فنجان من البلاستيك يحتوى على 375 g من الماء عند درجة 37°C . ما هي درجة الحرارة النهائية للخليط ؟ إهمل أى تبادل حرارى مع الفنجان .

▪ 10 ـ صبت كمية من الرصاص المصهور كتلتها 45 g ودرجة حرارتها 327°C فى حفرة فى قالب من الثلج درجة حرارته 0°C . ما هى كمية الثلج المنصهرة عندما يصل الرصاص إلى حالة اتزان حرارى مع قالب الثلج ؟

▪ 11 ـ أسقطت كمية من الزئبق الصلب كتلتها 36 g ودرجة حرارتها −39°C فى إناء كبيرة يحتوى على خليط من الماء والثلج عند درجة 0°C، فكانت درجة الحرارة النهائية عند الاتزان الحرارى هى 0°C أيضًا . ما هى كمية الثلج الإضافية الناتجة عن إضافة الزئبق ؟

▪ 12 ـ ما هى كمية العرق التى يجب أن تتبخر من سطح جلد طفل رضيع كتلته 4.5 kg حتى تنخفض درجة حرارة جسمه بمقدار 2.2 C° ؟ حرارة تبخير الماء عند درجة حرارة الجسم 580 cal/g .

▪ 13 ـ متوسط قدرة الإشعاع الشمسى الساقط على الغلاف الجوى للأرض لكل سنتيمتر مربع تساوى 0.138 W/cm² تقريبًا ، ومن المعلوم أن الجزء الأعظم من هذه القدرة يمتص فى الغلاف الجوى قبل الوصول إلى سطح الأرض . لنفرض أن 0.09 فى المائة من القدرة الأصلية يتم امتصاصه بواسطة سطح بحيرة ، ما هى كتلة الماء المتبخر لكل مليمتر مربع من سطح البحيرة فى الساعة ؟ استخدم نفس قيمة حرارة التبخير المعطاة فى المسألة 12 .

▪ 14 ـ لنفرض أننا أسقطنا 225 g من رصاص درجة حرارته 120°C فى فنجان من الألنيوم كتلته 30 g ودرجة حرارته 25°C يحتوى على 75 g من الماء عند نفس درجة الحرارة . ما هى درجة الحرارة عند الاتزان ؟

▪ 15 ـ أضيفت كمية كافية من ثلج درجة حرارته −15°C إلى 90 g من الماء الموجود فى فنجان من النحاس كتلته 40 g عندما كانت درجة حرارتها الابتدائية 40°C . إذا كانت درجة الحرارة النهائية عند اتزان النظام 20°C ، فما هى كمية الثلج المضافة ؟

▪ 16 ـ تحتوى علبة من الصفيح كتلتها 60 g على 45.0 g من الماء و 15.0 g من الثلج فى حالة اتزان حرارى عند 0°C . وعندما أضيفت كمية من الرصاص الساخن كتلتها 275 g ببطء إلى خليط الماء والثلج وجد أن درجة الحرارة النهائية للعلبة ومحتوياتها 14°C . ما هى درجة الحرارة الأصلية للرصاص ؟

17 ـ بفرض أن حرارة تبخير الماء تستهلك كلها فى فصل 1 g من جزيئات الماء عن بعضها البعض عند نقطة الغليان ، ما نصيب الجزئ الواحد من هذه الطاقة ؟ قارن هذه الكمية من الطاقة بقيمة kT عند درجة الغليان .

18 ـ من أى ارتفاع يجب أن تسقط طلقة من الرصاص كتلتها 1 g ودرجة حرارتها 250°C بحيث تنصهر عند اصطدامها بالشارع ؟ افترض أن كل الطاقة الميكانيكية للطلقة يتم امتصاصها كحرارة بواسطة الطلقة وحدها .

19 ـ استخدم سخان كهربائى قدرته 2500 W فى تسخين الماء فى خزان . ما هو الزمن اللازم لتسخين 250 kg من الماء من درجة 15°C إلى 70°C ؟ افترض أن الخزان معزول عن الوسط المحيط تمامًا .

▪ 20 ـ سخان مياه منزلى يدخل الماء البارد فى خزانه عند درجة 18.0°C ويخرج منه عند درجة 75°C ، ومعدل سحب الماء الساخن من الخزان 400 cm³/min . بفرض أن معدل سحب الماء الساخن ثابت عند هذه القيمة ، ما هى قدرة السخان الكهربائى المستخدم لتسخين الماء ؟ افترض أن الخزان معزول عزلاً حراريًا مثاليًا عن الوسط المحيط .

▪ 21 ـ تستهلك امرأة كتلتها 60 kg كمية قدرها 2500 kcal من الطاقة الغذائية يوميًا . فإذا كان متوسط معدل فقد الطاقة من المرأة إلى الوسط المحيط خلال الأربع وعشرين ساعة 110 W ، فما هى الكمية الباقية من الطاقة الغذائية والتى يمكنها

استهلاكها فى تمارين رياضية ؟ وإذا كان التعرين الرياضى الذى تود المرأة استهلاك هذه الطاقة فيه هو صعود السلالم ، فما هو الارتفاع الذى يجب أن تصعده ؟

■ 22 ـ تزحلقت فتاة كتلتها 50 kg على قدميها فى مباراة لكرة السلة بينما كانت تجرى بسرعة مقدارها 4.8 m/s واستمرت متزنة أثناء التزحلق إلى أن توقفت تمامًا . ما هى كمية الحرارة المتولدة خلال فترة التزحلق ؟ افترض أن كل هذه الحرارة قد تم امتصاصها فى جزء من لحم الفتاة مساحته $20\ cm^2$ وسمكه 1.0 mm . ما مقدار الارتفاع فى درجة حرارة هذا الجزء ؟ افترض أن c = 0.83 cal/g و $\rho = 950\ kg/m^3$ للحم الإنسان .

■■ 23 ـ يحتوى فنجان من النحاس كتلته 50 g معزول عن الوسط المحيط على 125 g من الماء عند درجة 20.5°C . وضع خليط من برادة النحاس الأصفر والذهب كتلته 310 g ودرجة حرارته 145°C فى الماء ، فوجد أن درجة الحرارة عند الاتزان 42.3°C . ما هى نسبة برادة الذهب فى الخليط ؟ اعتبر أن c = 0.031 cal/g . C° للذهب ، c = 0.090 cal/g . C° للنحاس الأصفر .

■ 24 ـ جمعت المجسات الفضائية البيانات الآتية عن كوكبى المريخ والزهرة : (أ) درجة حرارة سطح الزهرة بالتقريب 458°C ، (ب) الضغط الجوى على سطح المريخ 0.006 قدر الضغط الجوى القياسى على سطح الأرض تقريبًا . باستخدام هذه المعلومات وكذلك رسم بيان الطور للماء (شكل 6-11) ، ماذا تستنتج عن حالة الماء على هذين الكوكبين ؟

القسم 8-11

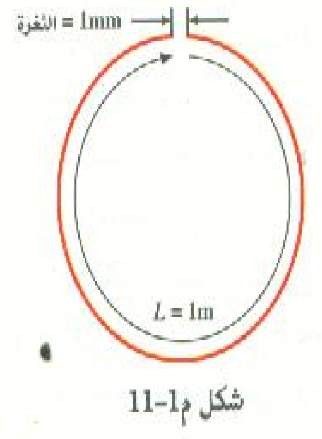
25 ـ سخنت مسطرة مترية من الألمنيوم من درجة 10°C إلى 45°C . ما هو التغير النسبى فى طولها ؟

26 ـ كرة من النحاس الأصفر نصف قطرها 3.5500 cm عند درجة −12°C ما هو نصف قطرها عند درجة 55°C ؟

27 ـ تستخدم قضبان من الصلب طول كل منها 12.5 m عند درجة $T = -30°C$ فى إنشاء خطوط السكك الحديدية . وفى مشروع من هذا النوع رصت القضبان طرفًا على طرف فى خط مستقيم بحيث كانت المسافة بين نهايتى كل قضيبين متتاليين كافية لتماسهما بالكاد عند درجة 45°C . ذلك أنه إذا لم تترك مثل هذه الثغرات فإن القضبان سوف تنبعج عند ارتفاع درجة الحرارة . ما هو اتساع كل من هذه الثغرات ؟

■■ 28 ـ أعطيت شريطين لقياس الطول أحدهما مصنوع من الصلب والآخر من الألمنيوم ، وكل منهما مدرج للقياس الصحيح (إلى أربعة أرقام معنوية) عند درجة 20°C . وعند قياس طول ماسورة عند درجة −15°C وجد أن قراءة الشريط المصنوع من الصلب 2.630 m . ماذا ستكون قراءة شريط القياس المصنوع من الألمنيوم ؟ ما هو الطول الحقيقى للماسورة (عند −15°C) لأربعة أرقام معنوية ؟

29 ـ ثنى سلك من النحاس طوله 1 m عند درجة 110°C على شكل دائرة مع ترك ثغرة فاصلة بين نهايتيه طولها 1 mm (شكل م1-11) . ماذا يحدث للثغرة عند تسخين السلك ؟ هل تختفى الثغرة عند درجة حرارة ما ؟



شكل م1-11

30 ـ من المعتاد استخدام طريقة توافق الانكماش فى الورش الميكانيكية لتركيب القضبان الأسطوانية فى ثقوب بالعجلات والقوالب والألواح المعدنية لنفرض أننا نريد تركيب قضيب قطره 2.0125 cm فى ثقب بقالب من النحاس الأصفر قطره 1.9975 . (هذه الأبعاد مقاسة عند درجة 20°C) . إلى أى درجة حرارة يجب تسخين القالب حتى يمكن تركيب (حشر) القضيب (بدون تسخينه) فى الثقب ؟

31 ـ قارورة من الزجاج المقاوم للحرارة تم معايرتها بحيث تستوعب $100.0\ cm^3$ تمامًا من سائل عند درجة 20°C . ما هو

الحجم الإضافي من السائل الذى تحمله القارورة عند درجة 50°C ؟ **تلميح** : تذكر أن القارورة المجوفة تتمدد كما لو كانت مصمتة تمامًا .

■ 32 ـ افترض أن لديك إناء من الصلب سعته $500\ cm^3$ عند درجة 10.0°C− وبداخله كرة من النحاس الأصفر نصف قطرها 3.50 cm . ملأ الإناء بعد ذلك إلى حافته بالميثانول (الكحول الميثيلى) . فإذا ترك الإناء بمحتوياته حتى وصلت درجة حرارته إلى درجة الغرفة وقدرها 27.0°C ، فما هى كمية الميثانول المنسكبة من الإناء ؟ (حجم الكرة هو $V = \frac{4}{3}\pi R^3$) .

■ 33 ـ سلكان أحدهما من الصلب والآخر من النحاس الصفر يستطيلان بنفس القدار عندما تتغير درجتا حرارتهما بنفس المقدار . ما هى النسبة بين طولى السلكين ؟

القسم 9-11

34 ـ لوح من الخشب الرقائقى (الأبلكاج) ($k = 0.083$ W/K . m) أبعاده السطحية 1.3 m × 2.7 m وسمكه 2.1 cm . ما هى كمية الحرارة المنسابة بين وجهيه خلال 1 h إذا كانت درجة حرارتهما 10°C− و 27°C ؟

35 ـ ما هى كمية الحرارة المنسابة خلال حائط من الخرسانة مساحته $15\ m^2$ وسمكه 30 cm فى 1 h إذا كانت درجة الحرارة 0.0°C على أحد جانبيه 22.3°C على الجانب الآخر ؟

■ 36 ـ أثبتت دراسات الحفر العميق للأرض أن درجة الحرارة تزداد بحوالى 1°C لكل 30 m . إذا فرضنا أن $k = 1.5$ W/K . m للقشرة الأرضية ، فما هى كمية الحرارة المنسابة إلى الخارج فى الثانية لكل متر مربع من القشرة الأرضية ؟

■ 37 ـ تستخدم ماسورة من النحاس الأصفر قطرها الداخلى 7.5 cm وسمك جدارها 0.20 فى نقل بخار ماء درجة حرارته 120°C فى أحد المصانع . فإذا كانت درجة حرارة الهواء المحيط 27°C ، فما معدل فقد الحرارة لكل متر من طول الماسورة ؟

■ 38 ـ صندوق للتبريد الثلجى ، من النوع المستعمل فى حفظ المأكولات والمشروبات المثلجة فى الرحلات الخلوية ، مصنوع من البلاستيك الرغوى وأبعاده الخارجية 45 cm × 35 cm × 30 cm ، وسمك جدرانه 3.75 cm . فإذا أريد أن تظل درجة الحرارة داخل الصندوق ثابتة عند 0°C عندما تكون درجة الحرارة الخارجية 30°C ، فما هى كمية الثلج المنصهرة داخل الصندوق فى كل ساعة ؟

القسم 11-11

39 ـ سخنت كرة معدنية نصف قطرها 1.8 cm . وابتعاثيتها 0.55 إلى درجة 550°C ثم علقت فى سلك دقيق فى غرفة درجة حرارتها 25°C . (أ) بأى معدل تشع هذه الكرة الطاقة فى البداية ، بفرض أن امتصاصها للطاقة من الغرفة مهمل ؟ (ب) ما هو صافى معدل فقد الطاقة الابتدائى بواسطة الكرة ؟

■ 40 ـ فتيلة من سلك التنجستين الساخن نصف قطرها 0.060 cm ودرجة حرارتها 3000 K وابتعاثيتها 0.74 . احسب معدل انبعاث الطاقة لكل 1 m من طول السلك . إهمل الإشعاع الذى تستقبله الفتيلة من البيئة المحيطة .

■ 41 ـ استخدم لوح أسود ($e = 0.90$) كمجمع شمسى . وضع اللوح فى ضوء الشمس المباشر فكان معدل امتصاصه للطاقة 800 W لكل متر مربع من سطحه . إلى أى درجة حرارة يصل اللوح عند الاتزان ؟ افترض أن السطح الخلفى للوح معزول عزلًا مثاليًا وأن السطح الأمامى يفقد الطاقة بالإشعاع فقط .

■ 42 ـ يمتص مجمع شمسى فى نظام لتسخين الماء الإشعاع الشمسى بمعدل قدره $660\ W/m^3$. فإذا علمت أن مساحة السطح المجمع $3.8\ m^2$ ودرجة حرارة الماء البارد الداخل إلى المجمع 15°C ، فما هو حجم الماء الخارج من المجمع فى الدقيقة إذا كانت درجة حرارته 60°C ؟

القسم 12-11

43 ـ ما هى القيمة R لطبقة سمكها 1.4 cm مصنوعة من (أ) الزجاج ؟ (ب) الخشب الرقائقي (الأبلكاج) ؟ استخدم القيم المعطاة بالجدول 4-11 .

■ 44 ـ إذا كانت الماسورة المذكورة فى المسألة 37 ملفوفة بطبقة من الألياف الزجاجية سمكها 3.0 cm ، بأى نسبة يقل الفقد الحرارى منها ؟

45 ـ قارن بين معدلات الفقد الحرارى خلال الحوائط الآتية ، بفرض أن الفرق بين درجتى الحرارة بالداخل والخارج متساوى فى جميع الحالات : (أ) طبقة سمكها 15.0 cm من الألياف الزجاجية بين لوحين من الجبس سمك كل منهما 1.75 cm . (ب) حائط خرسانى سمكه 30 cm مغلف من الجانبين بألواح سمكها 2.0 cm من الأبلكاج ، (جـ) شباك ذو زجاج مزدوج .

مسائل عامة

46 ـ يتدفق الماء فى صورة تيار مستمر إلى شلال ارتفاعه 70 cm . إذا تحولت طاقة الجهد التثاقلى للماء إلى حرارة ، فما هو الارتفاع فى درجة حرارة الماء عند قاع الشلال عن قيمتها عند قمته ؟

■ 47 ـ اصطدمت طلقة من الرصاص كتلتها 2.5 g عندما كانت متحركة بسرعة قدرها 210 m/s بكيس ملئ بالرمل فتوقفت عن الحركة داخله . (أ) بفرض أن الشغل الاحتكاكى مع الرمل يتحول كلية إلى طاقة حرارية للطلقة ، ما هو الارتفاع فى درجة حرارة الطلقة عند وصولها إلى السكون ؟ (ب) أجب عن نفس السؤال إذا استقرت الطلقة فى قالب خشبى كتلته 90 g يمكنه الحركة بحرية بعد ارتطام الطلقة به .

■■ 48 ـ عمود حديدى طوله 8.5 m ومساحة مقطعه $85\ cm^2$ طرفاه مدفونان فى حائطين خرسانيين ، وكانت درجة الحرارة عند تجهيز هذا الهيكل 10°C . ما هى القوة التى يؤثر بها العمود على الحائطين عند ارتفاع درجة الحرارة إلى 34°C ؟ (اعتبر أن معامل يونج للحديد $Y = 19 \times 10^{10}\ N/m^2$) .

■■ 49 ـ ربط طرفا سلك من النحاس الأصفر فى نقطتين ثابتتين عندما كانت درجة حرارة السلك 700°C . ما هى درجة الحرارة التى ينقطع عندها السلك عند تبريده ؟ مقاومة الكسر للنحاس الأصفر فى حالة الشد تساوى $0.45 \times 10^9\ N/m^2$.

■■ 50 ـ قالب من الصلب حجمه $1.25\ m^3$ عند مستوى سطح البحر ودرجة الحرارة 20°C . ألقى هذا القالب فى المحيط فوصل إلى قاع أخدود محيطى يقع على عمق قدره 11,500 m من السطح ودرجة حرارة الماء فيه 5.5°C . احسب التغير الناتج فى حجم القالب .

■■ 51 ـ تدور كرة منتظمة من الصلب نصف قطرها R_0 وكتلتها M فى حركة مغزلية حول مركزها بسرعة زاوية مقدارها ω_0 عند درجة 27°C . فإذا رفعت درجة حرارة الكرة إلى 350°C بدون أن يؤثر ذلك على انتظام الكرة . فما هى قيمة كل من السرعة الزاوية للكرة وطاقة حركتها الدورانية عند درجة الحرارة الجديدة ؟

■ 52 ـ رفعت درجة حرارة مكعب معدنى طوله الأصلى L_0 بمقدار ΔT فأصبح حجمه $(L_0 + \Delta L)^3$. استخدم هذه البيانات ونظرية ذات الحدين لإثبات أن معامل التمدد الحجمى لمادة المكعب ، كتقريب من الرتبة الأولى ، يساوى 3α ؛ حيث α معامل التمدد الطولى لمادة المكعب .

■ 53 ـ قرص من الألمنيوم كتلته 55 kg ونصف قطره 17.5 cm . بينما كان هذا القرص يدور حول محوره بمعدل قدره 9.9 rev/s استخدمت فرملة فى التأثير على حافة القرص بقوة احتكاك مما سبب توقف القرص . فإذا كان 75 فى المائة من الشغل المبذول بواسطة الاحتكاك يتحول إلى حرارة فى القرص ، فما هى الزيادة الناتجة فى درجة الحرارة ؟

■■ 54 ـ تسقط كرة من الصلب نصف قطرها 0.22 cm فى الماء بسرعة تساوى سرعتها النهائية المعطاة بقانون ستوكس . ما هو معدل تولد الحرارة بواسطة القوة الاحتكاكية التى يؤثر بها الماء على الكرة ؟

الفصل الثانى عشر



القانون الأول للديناميكا الحرارية

قبل معرفة طبيعة الذرات والجزيئات بوقت طويل توصل علماء الفيزياء إلى استنباط طريقة مناسبة وفعالة لمناقشة الحرارة والشغل والطاقة الداخلية . وتتضمن هذه الطريقة وصف المادة بدلالة خواصها الماكروسكوبية* (الإجمالية) كالضغط ودرجة الحرارة والحجم وسريان الحرارة ؛ وهذه الطريقة لوصف سلوك الأجسام والمواد تسمى **الديناميكا الحرارية** . واليوم ، ورغم فهمنا الجيد تمامًا لسلوك الذرات والجزيئات ، ما زالت الديناميكا الحرارية مستخدمة على نطاق واسع فى جميع فروع العلم . ويعتبر هذا الفصل بمثابة مقدمة مبسطة لهذا المجال الهام والنافع من مجالات الدراسة .

12-1 متغيرات الحالة

يناقش سلوك المادة عادة فى الديناميكا الحرارية بدلالة عينة محددة منها تسمى النظام الديناميكى الحرارى . وقد يكون هذا النظام جزيئات الغاز فى إناء ما أو الجزيئات فى محلول ، بل إنه قد يكون نظامًا معقدًا كالجزيئات فى شريط من المطاط . ولكى تكون المناقشة الديناميكية الحرارية ذات معنى يجب أن يكون النظام محددًا تحديدًا دقيقًا ، وفى هذه الحالة فقط يمكننا وصف النظام بطريقة واضحة لا غموض فيها . فمثلاً ، لتصميم تربين بخارى لاستخدامه فى توليد الكهرباء يحتاج المهندسون إلى معرفة ضغط ودرجة

* **الخواص الماكروسكوبية** هى تلك الخواص المتعلقة بالتأثيرات المتوسطة لعدد كبير جدًا من الجزيئات .

حرارة بخار الماء ، وكذلك الحجم الذى يشغله بخار الماء عند مروره خلال التربين . وعند ذلك فقط يستطيع المهندسون معرفة مقدار القدرة الكهربائية التى يمكن أن يولدها التربين من كمية معينة من الطاقة الحرارية .

ولوصف النظام الديناميكى الحرارة فإننا نستخدم كميات معينة تنطبق على النظام بأكمله أو على جزء محدد تحديدًا دقيقًا منه . والكميات النموذجية القابلة للقياس بسهولة والمستخدمة فى وصف أى نظام هى الضغط ودرجة الحرارة والحجم . كما تستخدم أيضًا فى الديناميكا الحرارية كميات أخرى كالطاقة الداخلية والحرارة والشغل ، وكمية أخرى سنقابلها فيما بعد تسمى الانتروبيا . وإذا تغيرت حالة النظام قد تتغير هذه الكميات كلها أو بعضها . كذلك فإن من المهم أن نعلم أن هذه الكميات تكون مناسبة لتمثيل الحالة المضبوطة للنظام . لنتعرف الآن على هذه الكميات .

عندما يصل إناء يحتوى على عدد قدره n مولاً من غاز مثالى إلى حالة الاتزان سوف يصل كل من حجمه وضغطه ودرجة حرارته إلى قيمة محددة . وإذا علمت أى كميتين من الكميات الثلاث T, P, V ، يمكن حساب الكمية الثالثة من قانون الغاز المثالى (المعادلة 10-1) ، وبالتالى تصبح هى أيضًا معلومة . ويسمى هذا الموقف المحدد ، الذى يتحدد بقيم معينة للكميات T, P, V للغاز (النظام) **بالحالة الديناميكية الحرارية للنظام** . ومتى عاد الغاز (النظام) إلى نفس قيم T, P, V فإن حالة النظام ستعود كما كانت أصلاً . وبالرغم من أن كل جزئ بالنظام قد لا يسلك سلوك الجزيئات الأخرى تمامًا عند وجود النظام فى حالة معينة ، فإن خواص النظام ككل ستظل دائمًا كما هى من الناحية الماكروسكوبية .

ويمكن صياغة هذا المعنى بأسلوب آخر كالتالى . **لكل نظام خواص معينة قابلة للقياس تكون لها دائمًا نفس القيمة عندما يتواجد النظام فى نفس الحالة الديناميكية الحرارية ؛ وتسمى المتغيرات التى تصف هذه الخواص بمتغيرات الحالة .** فمثلاً متغيرات حالة نظام مكون من غاز هى P, V, T . ومعنى ذلك أن كل حالة اتزان معينة للغاز تتميز دائمًا بنفس قيم متغيرات الحالة هذه بصرف النظر عن الطريقة التى وصل بها الغاز إلى هذه الحالة .

الطاقة الداخلية للنظام هى كمية هامة أخرى من الكميات المستخدمة لوصف حالة النظام :

الطاقة الداخلية (U) لنظام ما هى مجموع طاقتى الحركة والوضع لجميع الذرات أو الجزيئات المكونة لهذا النظام .

وتعتبر الطاقة الداخلية مثالاً لخاصية من الخواص الفيزيائية التى تسمى **دوال حالة النظام** . وتعرف دالة حالة النظام بأنها تلك الخاصية الفيزيائية التى يمكن تعريفها تمامًا بدلالة متغيرات الدالة . ويمكننا أن نستنتج بناء على ذلك أن قيمة أى من دوال حالة النظام ، كالطاقة الداخلية مثلاً ، **لا تعتمد على نوع العمليات التى يصل بها النظام إلى حالته المعنية** .

الطاقة الداخلية إذن دالة حالة للنظام . وعلى العكس فإن الحرارة والشغل ليسا من دوال الحالة ، وذلك لأن كمية الحرارة المضافة إلى النظام أو الشغل المبذول على النظام لتغيير حالته بمقدار معين تعتمد على العملية المستخدمة لحدوث هذا التغير فى الحالة . وبذلك يكون السؤال عن « كمية الحرارة التى يحتوى عليها النظام » سؤالاً لا معنى له . فالنظام لا « يحتوى على » حرارة أو شغل ، لأن هذين المفهومين يمثلان عمليتين لانتقال الطاقة إلى النظام أو من النظام . فالحرارة تمثل انتقال الطاقة الحرارية التى قد تسبب تغير الطاقة الداخلية للنظام . ولكن هذا النوع من انتقال الطاقة يمثل فقط إحدى طرق تغيير الطاقة الداخلية . ذلك أن الطاقة الداخلية يمكن أن تتغير أيضًا نتيجة للشغل الميكانيكى المبذول على النظام ، كالاحتكاك أو الانضغاط على سبيل المثال .

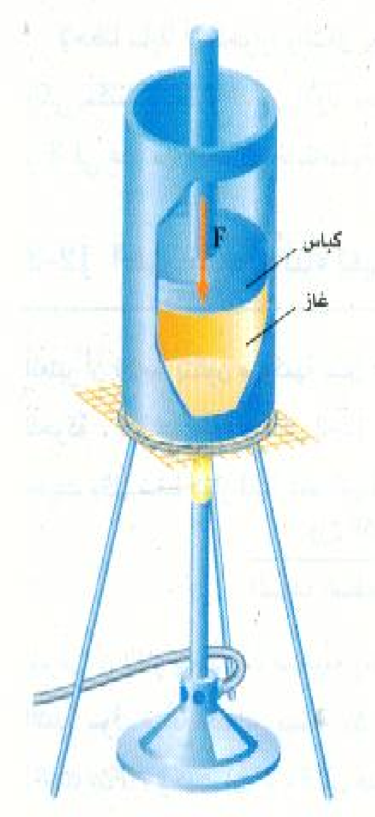
12-2 القانون الأول للديناميكا الحرارية

كان الباحثون القدامى فى مجال الديناميكا الحرارية أول من توصل إلى فكرة بقاء الطاقة . وبعد أن تمكن هؤلاء العلماء من إثبات أن الحرارة صورة من صور الطاقة ، أصبح من الضرورى أن تؤخذ الحرارة فى الاعتبار عند إعداد « حساب الأرباح والخسائر » فى الطاقة ، وبهذه الطريقة أمكنهم التوصل إلى علاقة أساسية هامة بين الحرارة والشغل والطاقة الداخلية . لنتعرف الآن على هذه العلاقة .

لكل نظام فى حالة معينة كمية محددة من الطاقة الداخلية ، وإننا نتساءل الآن عما يحدث للنظام عندما تنساب إليه كمية من الحرارة . هذه الطاقة المضافة يمكن أن تستعمل بطريقتين : (1) زيادة الطاقة الداخلية للنظام ، أو (2) إمداد النظام بالطاقة التى يحتاجها لكى يبذل كمية من الشغل W على الوسط المحيط به . فإذا أخذنا النظام الموضح بالشكل 1-12 والذى يمثل غازًا فى أسطوانة فإننا سنجد أن الطاقة المضافة يمكنها أن تسبب تغيرين فى النظام : (1) رفع درجة حرارة الغاز ومن ثم زيادة طاقته الداخلية ، (2) تمدد الغاز مما يؤدى إلى رفع الكباس إلى أعلى مما يسمح للغاز بأن يبذل شغلاً على الكباس .

وإذا فحصنا أى نظام فإننا سنجد أن الطاقة المضافة إليه تستهلك دائمًا بنفس هاتين الطريقتين ، وهكذا يمكننا أن نستنتج أن :

(الشغل الخارجى المبذول بواسطة النظام) + (الزيادة فى الطاقة الداخلية للنظام) = (الطاقة المضافة إلى النظام)



شكل 1-12: عند إضافة الحرارة إلى الغاز الموجود فى الإناء يمكن أن تزداد طاقته الداخلية ، كما يمكن للغاز أن يبذل شغلاً ضد القوة الخارجية المؤثرة على الغاز بواسطة المكبس نتيجة لتمدد الغاز .

وهذه الصيغة تسمى **القانون الأول للديناميكا الحرارية** ، والذى يمكن كتابته فى صورة المعادلة :

$$Q = \Delta U + W \qquad (12\text{-}1)$$

لاحظ أن القانون الأول هو صيغة خاصة لقانون بقاء الطاقة تتضمن الطاقة الداخلية .

عند تطبيق القانون الأول يجب مراعاة الحرص الشديد فى اختبار الإشارات الصحيحة للكميات الداخلة فيه . فالكمية Q هى دائمًا كمية الحرارة المنسابة **إلى النظام** ، أما إذا كانت الحرارة تنساب **من النظام** فإن Q تكون سالبة . كذلك فإن ΔU هى **الزيادة** فى الطاقة الداخلية للنظام ، بينما W يمثل الشغل المبذول **بواسطة النظام** . فإذا كان الغاز فى الشكل 2–12 يسبب ارتفاع الكباس إلى أعلى ، فإن الغاز يبذل شغلاً خارجيًا ويكون W موجبًا . أما إذا دفع الكباس إلى أسفل بواسطة قوة خارجية فإن W سيكون سالبًا لأن الغاز يبذل شغلاً سالبًا . ولفهم هذه العبارة الأخيرة ، تذكر أن :

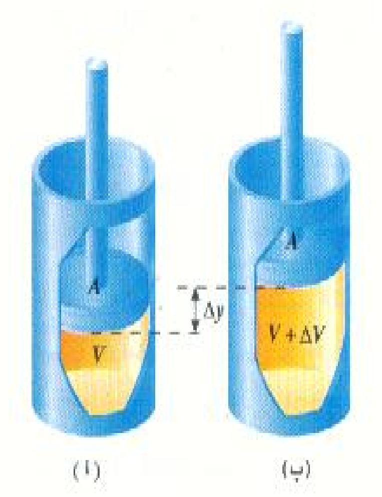
$$\text{الشغل} = \text{القوة} \times \text{الإزاحة} \times \cos\theta$$

حيث θ هى الزاوية بين متجه القوة ومتجه الإزاحة . ويلاحظ فى الشكل 1–12 أن القوة التى يؤثر بها الغاز على الكباس إلى **أعلى تساوى F** (بفرض أن الكباس يتحرك بسرعة ثابتة) . وعندما يتحرك الكباس إلى **أسفل** مسافة قدرها Δs فإن الشغل المبذول بواسطة الغاز سيكون :

$$W = F\,\Delta s \cos 180° = -F\,\Delta s$$

إذن : عندما **ينضغط الغاز يكون الشغل المبذول بواسطته سالبًا** .

لاحظنا سابقًا أن الحرارة والشغل يعتمدان على الطريقة التى تتغير بها حالة الغاز . ولكى يمكننا استخدام القانون الأول يجب علينا الآن دراسة طرق حساب كل من Q و W فى عدد من العمليات الديناميكية الحرارية .



شكل 2–12:
إذا كانت المساحة السطحية للكباس A فإن : $\Delta V = A\Delta y$.

3–12 الشغل المبذول أثناء تغير الحالة الديناميكية الحرارية

لنعتبر أن نظامنا يتكون من كمية من غاز محبوس فى أسطوانة مغلقة بكباس قابل للحركة ، كما هو مبين بالشكل 2–12 . ولنفرض أن الغاز يحمل بالكاد وزن هذا الكباس بحيث يظل ضغط الغاز ثابتًا عند القيمة المعطاة بالعلاقة :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\text{وزن الكباس}}{\text{المساحة السطحية للكباس}}$$

لنفرض أن الغاز يتمدد عند تسخينه بمقدار ΔV كما هو مبين بالجزء (ب) . أثناء هذا التمدد سوف يرتفع الكباس مسافة Δy ، ويكون الشغل المبذول بواسطة الغاز أثناء التمدد ($F\Delta y \cos\theta$) . وحيث أن $\theta = 0°$ فى هذه الحالة إذن :

$$W = F\,\Delta y = PA\,\Delta y$$

وحيث أن $A\,\Delta y$ هى الزيادة فى حجم الغاز ΔV ، إذن :

$$W = P\,\Delta V \qquad (12\text{–}2)$$

وإذا فقدت الحرارة من النظام فإن الغاز ينكمش ، وعندئذ تكون ΔV سالبة ، وبالتالى



تعتبر آلة الاحتراق الداخلى مثالاً أصيلاً للآلة الحرارية . وفى هذه الآلة تبذل الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق خليط الوقود والهواء شغلاً على الكباسات ، وهذا بدوره يسبب دوران العمود المرفقى وتحرك السيارة . ويلاحظ هنا أن الجزء الأعظم من الطاقة الحرارية يفقد فى صورة عادم حرارى فى الغازات المنصرفة .

يكون الشغل المبذول بواسطة الغاز سالبًا أيضًا . وفى تلك الحالة يقال أن الوسط المحيط قد بذل شغلاً على النظام .

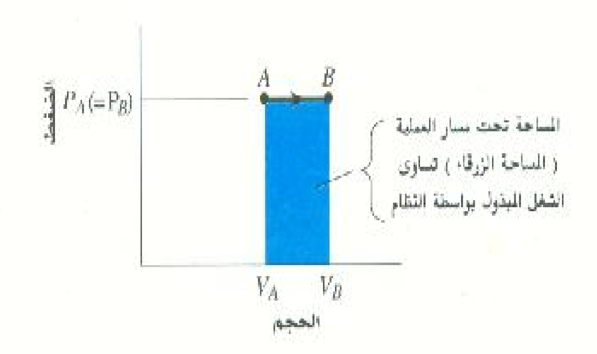
ومن الطبيعى أن التمدد عند ثبوت الضغط ما هو إلا إحدى الطرق العديدة التى يمكن أن يتغير بها حجم النظام ، وفى حالة ثبوت الضغط يكون حساب الشغل أمرًا فى غاية البساطة : $W = P \Delta V$. ولكن الشغل يبذل دائمًا (بواسطة النظام أو على النظام) طالما كان هناك تغير فى حجم النظام ، وبصرف النظر عن العملية التى يتغير بها الحجم . هذا يوضح بجلاء حاجتنا إلى طريقة عامة لحساب الشغل فى كل من العمليات الديناميكية الحرارية ، وليس فقط فى العمليات ثابتة الضغط . ويمكن تحقيق ذلك بالاستعانة بمنحنى الضغط مقابل الحجم ، والذى يسمى **بالرسم البيانى PV** (شكل 3-12) . وتتضح أهمية مثل هذا المنحنى فى أن **أى نقطة على الرسم البيانى PV تمثل حالة ديناميكية حرارية معينة للغاز** . ذلك أنه إذا علمنا قيمتى P و V للغاز يمكن حساب درجة الحرارة باستخدام قانون الغاز المثالى .

النقطتان A و B فى الشكل 3-12 تمثلان حالتين مختلفتين لعينة من غاز عند نفس الضغط $P_A = P_B = P$. أما الخط الواصل من A إلى B **فيمثل العملية التى تؤدى إلى تغيير حلة الغاز** ، ويلاحظ أن اتجاه السهم على هذا الخط يوضح الطريقة التى يحدث بها التغير فى الحالة . ويوضح الخط الأفقى المستقيم أن التغير يحدث عند ثبوت الضغط . وتجدر الإشارة فى هذه النقطة إلى أنه يمكن توصيل النقطة A بالنقطة B بعدد لا نهائى من المسارات التى يمثل كل منها عملية ديناميكية حرارية مختلفة ، وبالتالى كمية مختلفة من الشغل .

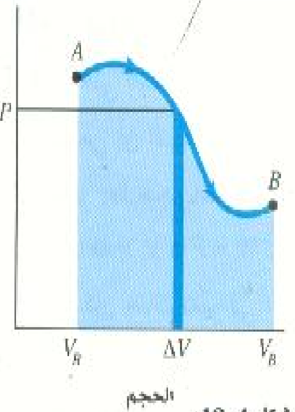
نحن نعلم الآن كيفية حساب الشغل أثناء العملية ثابتة الضغط الموضحة بالشكل 3-12 :

$$W = P\,\Delta V = P\,(V_B - V_A)$$

لاحظ أن $P\,(V_B - V_A)$ **هى المساحة تحت الخط AB** ، أى مساحة المستطيل الأزرق بالشكل 3-12 . لنفترض الآن أن الغاز يمر بعملية انضغاط من الحالة B إلى الحالة A . عندئذ سيكون ΔV ، ومن ثم W ، سالبًا ، مما يشير إلى أن الشغل يبذل على النظام فى هذه الحالة . وحيث أن المساحة تحت الخط لم تتغير ، من الضرورى إذن استخدام الإشارة الجبرية الصحيحة وذلك بملاحظة ما إذا كان الحجم يزداد (+) أو يقل (-) .



شكل 3-12:
الشغل المبذول بواسطة النظام أثناء التمدد عند ثبوت الضغط يساوى المساحة تحت المنحنى PV .



شكل 4–12:
الشغل المبذول بواسطة النظام عند انتقاله من الحالة A إلى الحالة B بأى عملية ديناميكية حرارية يساوى المساحة المحصورة تحت المنحنى PV الذى يمثل العملية .

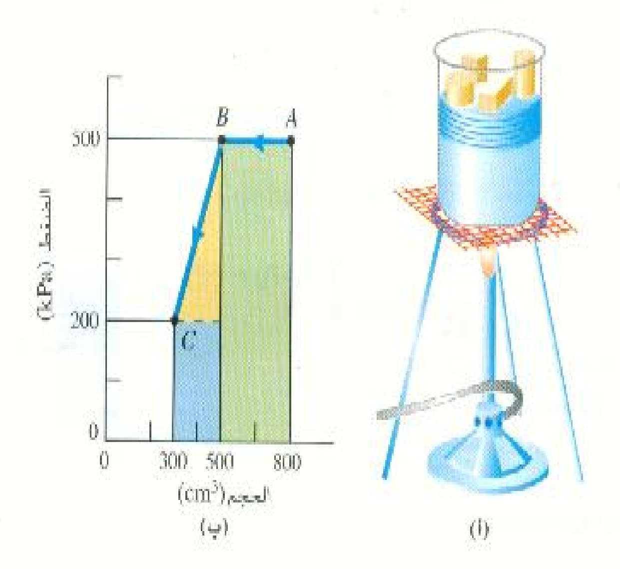
لنعمم الآن هذه النتيجة . اعتبر العملية الاختيارية (الاعتباطية) الممثلة بالمنحنى AB فى الشكل 4–12 . فى مثل هذه الحالة تتغير الكميات P, V, T كلها أثناء العملية ، ولكن المنطقة ذات اللون الأزرق الغامق فى الشكل تمثل جزءًا صغيرًا جدًا من العملية ، صغيرة إلى درجة تكفى لاعتبار الضغط ثابتًا أثناءها . وهكذا فإن الشغل المبذول فى هذا الجزء من العملية يساوى $P\Delta V$. ولإيجاد الشغل الكلى المبذول خلال العملية من A إلى B كلها ، يمكننا النظر إلى هذه العملية كما لو كانت مكونة من عدد كبير جدًا من مثل هذه التغيرات الحجمية الصغيرة ، والتى يبذل خلال كل منها كمية من الشغل تساوى المساحة المحصورة تحت المنحنى PV الخاص بها . وعليه فإن الشغل الكلى المبذول يساوى مجموع هذه المساحات الصغيرة ؛ أى المساحة المحصورة تحت المنحنى من A إلى B (المساحة الملونة باللون الأزرق الفاتح) . وهكذا يستنتج أن :

الشغل المبذول أثناء تغير الحالة الديناميكية الحرارية يساوى المساحة المحصورة تحت منحنى العملية فى الرسم البيانى PV .

ويكون الشغل موجبًا عند زيادة الحجم نتيجة للعملية الديناميكية الحرارية ، ويكون سالبًا عند نقصه .

مثال توضيحى 1–12

أضيفت الأثقال تدريجيًا على الكباس الموضح بالشكل 5–12 أ أثناء تغير درجة حرارة الغاز فى الأسطوانة بحيث انكمش الغاز بالطريقة الموضحة بالرسم البيانى PV للنظام ، والمبين بالشكل 5–12 ب . أوجد الشغل المبذول بواسطة الغاز عند انتقاله من الحالة A إلى B إلى C .



شكل 5–12:
ما هى كمية الشغل المبذول بواسطة الغاز عند انتقاله من الحالة A إلى الحالة C بالعملية الممثلة بالمسار ABC ؟

استدلال منطقي : يجب حساب المساحة المحصورة تحت المنحنى . لاحظ أن هذا الشكل غير المنتظم مكون من ثلاثة أشكال بسيطة : المستطيلان الأخضر والأزرق ، والمثلث الأصفر . علينا إذن حساب مساحة كل من هذه الأشكال البسيطة ثم جمع المساحات الناتجة لنحصل على المساحة المطلوبة . المساحة تحت الجزء الأخضر AB هي :

$$(5.0 \times 10^5 \text{ Pa})\ [(800 - 500) \times 10^{-6} \text{ m}^3] \text{ F} = 150 \text{ J}$$

[لاحظ أن $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ، ومن ثم فإن $(1 \text{ Pa})(1\text{m}^3) = 1 \text{ N . m} = 1 \text{ J}$] . وبالمثل ، المساحة المحصورة تحت المنحنى من B إلى C هي :

$$(2.0 \times 10^5 \text{ Pa})(200 \times 10^{-6} \text{ m}^3) + \frac{1}{2}(3.0 \times 10^5 \text{ Pa})(200 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 70 \text{ J}$$

حيث استخدمنا حقيقة أن مساحة المثلث يساوى نصف حاصل ضرب طول القاعدة فى الارتفاع . إذن :

PV المساحة تحت المنحنى = $150 \text{ J} + 70 \text{ J} = 220 \text{ J}$

وحيث أن العملية التى نعالجها فى هذا المثال تتضمن نقصًا فى الحجم ، فإن الشغل المبذول بواسطة الغاز يكون سالبًا . وهكذا فإننا نستنتج أن الشغل المبذول بواسطة الغاز عند انتقاله من الحالة A إلى C مرورًا بالحالة B يساوى -220 J .

تمرين : ما مقدار الشغل المبذول بواسطة الغاز إذا كان الرسم البيانى PV للعملية على صورة خط مستقيم من A إلى C ؟ **الإجابة :** -180 J .

وإذا كانت المسارات الممثلة للعمليات الديناميكية الحرارية فى الرسم البيانى PV تعطى مساحات لا يمكن حسابها باستخدام المعادلات الهندسية البسيطة ، يمكننا تقريب المساحة المحصورة تحت المنحنى برسم العملية على ورقة رسم بيانى ثم عد المربعات الموجودة تحت المنحنى .

12-4 الطاقة الداخلية لغاز مثالى

علمنا فى الفصل العاشر أن طاقة الحركة الانتقالية الكلية لغاز مثالى تعتمد على درجة حرارة الغاز :

$$\text{KE}_{\text{trans}} = N(\overline{\text{KE}}) = N(\frac{3}{2}kT) = n(\frac{3}{2}RT) \qquad (4-10)$$

حيث N عدد جزيئات الغاز ، n عدد المولات من الغاز ، k ثابت بولتزمان . وسوف نحاول هنا فهم العلاقة السببية بين طاقة الحركة الانتقالية KE_{trans} والطاقة الداخلية للغاز U .

من المعلوم أن الغازات المكونة من ذرات فردية ، كالهليوم والأكسجين أحادى الذرة ، ليس لها طاقات داخلية أخرى خلاف طاقة الحركة الانتقالية* . وبناء على ذلك يمكننا ـ فى حالة الغازات أحادية الذرة ـ اعتبار أن الطاقة الداخلية تساوى طاقة الحركة الانتقالية :

$$U = \mathrm{KE}_{\mathrm{trans}} = \frac{3}{2}\, nR\Delta T$$ (للغاز أحادى الذرة)

ويستنتج من ذلك أن التغير فى درجة حرارة الغاز أحادى الذرة يرتبط بالتغير فى طاقته الداخلية طبقًا للعلاقة :

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR\, \Delta T \qquad (12\text{–}3)$$

ولكن الطاقة الداخلية فى حالة الغازات المكونة من جزيئات يمكن أن تتكون من الطاقتين الدورانية والتذبذبية بالإضافة إلى الطاقة الانتقالية . ذلك أن الذرات المكونة للجزيئات يمكنها أن تتذبذب فى اتجاه الروابط الكيميائية التى تربط بينها فى الجزىء . وعلاوة على ذلك فإن عزم القصور الذاتى لمثل هذه الجزيئات حول المحاور العمودية على هذه الروابط يكون كبيرًا ولا يمكن إهماله . ولذلك فإن الطاقة الداخلية U للغازات ثنائية الذرة (المكونة من ذرتين لكل جزئ) والغازات عديدة الذرات (المكونة من ثلاث ذرات فأكثر لكل جزئ) تكون أكبر من قيمتها فى حالة الغازات أحادية الذرة عند نفس درجة الحرارة ، ولكن المناقشة التفصيلية للجزيئات المركبة لا تقع ضمن أهداف هذا المقرر . ومع ذلك فقد ثبت أن الطاقة الداخلية U يمكن دائمًا كتابتها فى صورة عدد صحيح K مضروبًا فى $\frac{1}{2} nRT$.

$$U = K\left(\frac{1}{2} nRT\right)$$

فمثلاً ، $K = 3$ للغازات أحادية الذرة ، وهذا يعطى المعادلة (3–12) السابقة . أما فى حالة الغازات الأخرى فإن K يكون عددًا صحيحًا يساوى 3 أو أكبر من 3 ، وهذا يتوقف على نوع الغاز ودرجة حرارته .

يلاحظ من المعادلة (3–12) أن الطاقة الداخلية U لجميع الغازات المثالية تعتمد على متغير حالة واحد فقط هو T . وعليه فإن U هى متغير حالة أيضًا . وبذلك يمكننا أن نستنتج ما يلى :

عندما تتغير حالة أى غاز مثالى ، يعتمد التغير فى الطاقة الداخلية على درجتى الحرارة الابتدائية والنهائية فقط ، وليس على نوع العملية التى تتغير بها حالة الغاز المثالى .

---

* أهملنا الطاقة الداخلية المرتبطة بالإلكترونات والبروتونات والنيوترونات فى الذرة . ذلك أن التغيرات فى مركبات الطاقة الداخلية هذه لا تكون محسوسة إلا عند درجات الحرارة العالية جدًا ، والتى لن نتعامل معها فى هذا المقرر .

12-5 انتقال الحرارة والحرارتان النوعيتان للغازات المثالية

تعتمد كمية الحرارة المنتقلة إلى الغاز أو منه ، كالشغل تمامًا ، على تفاصيل العملية المستخدمة . (ولهذا فإن Q ليست دالة حالة للنظام) . وهناك نوعان من العمليات التى يمكن فيهما حساب الانتقال الحرارى مباشرة بمنتهى السهولة وهما : العمليات ثابتة **الحجم** والعمليات ثابتة **الضغط** .

العمليات ثابتة الحجم

عندما تضاف الحرارة إلى غاز مع حفظ حجمه ثابتًا **يكون الشغل المبذول صفرًا** (لأن $\Delta V = 0$) . ويخبرنا القانون الأول للديناميكا الحرارة أن الحرارة المضافة فى هذه الحالة تستهلك فى زيادة الطاقة الحرارية :

$$Q = \Delta U \quad \text{(عند ثبوت الحجم)} \qquad (12\text{–}4)$$

ولكننا نعلم من المعادلة (3–12) أن العلاقة بين ΔU و ΔT فى حالة الغازات أحادية الذرة تكون على الصورة $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$. وعليه ، يمكننا تمثيل العلاقة بين الحرارة المنتقلة إلى الغاز Q والتغير الناتج فى درجة حرارته ΔT بالمعادلة :

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$$

حتى هذه النقطة لم نتعرف إلا على كمية واحدة تربط بين كمية الحرارة Q والتغير الناتج فى درجة الحرارة ΔT لكمية معينة من المادة ، وهذه الكمية هى الحرارة النوعية للمادة $c = Q / m\,\Delta T$ ، حيث m كتلة العينة (المعادلة 1–11) . ولكن كمية المادة تقاس عادة فى حالة الغازات بالمولات ، ومن ثم يمكننا تعريف **الحرارة النوعية الجزيئية (أو المولارية)** C كالتالى :

$$C = \frac{Q}{n\Delta T} \qquad (12\text{–}5)$$

حيث n عدد المولات من الغاز . وحيث أن هذه النسبة تعتمد على نوع عملية الانتقال الحرارى ، علينا تمييز C برمز مناسب يشير إلى العملية التى نتحدث عنها . ولذلك فإننا سنستخدم الرمز C_V فى حالة العمليات ثابتة الحجم .

وباستخدام المعادلتين (3–12) و (4–12) سنجد أن $Q = \frac{3}{2} nR\Delta T$ ، وبالتعويض من هذه العلاقة الأخيرة فى المعادلة (5–12) سنحصل على العلاقة البسيطة الآتية :

$$C_V = \frac{3}{2} R \quad \text{(للغازات أحادية الذرة)}$$

أما فى حالة الجزيئات الأكثر تعقيدًا فإن نفس الطريقة تعطينا النتيجة العامة الآتية :

$$C_V = K\frac{R}{2}$$

حيث K عدد صحيح كما ذكرنا في القسم السابق .

العمليات ثابتة الضغط

رأينا سابقًا أن $W = P\,\Delta V$ في العمليـة ثابتـة الضغـط ، وبنـاء علـى ذلـك يمكـن كتابـة القانون الأول في هذه الحالة على الصورة :

$$Q = \Delta U + W = \Delta U + P\,\Delta V \qquad (12\text{–}6\ \text{أ})$$

وعندما يكون P ثابتًا فإن قانون الغاز المثالي يعطينا :

$$P\,\Delta V = nR\,\Delta T$$

وعليه فإن :

$$Q = \Delta U + nR\,\Delta T \qquad (12\text{–}6\ \text{ب})$$

وكما سبق أن عرفنا C_V ، تعرف الحرارة النوعية الجزيئية عنـد ثبـوت الضغـط C_P كالتالي :

$$C_P = \frac{Q}{n\Delta T} = \frac{\Delta U + P\Delta V}{n\Delta T}$$

$$= \frac{\Delta U}{n\Delta T} = \frac{nR\Delta T}{n\Delta T} = C_V + R$$

وحيث أن هذه النتيجة لا تعتمد على نوع الغاز ، إذن :

$$C_P = \frac{3}{2}R + R = \frac{5}{2}R \quad \text{(للغازات أحادية الذرة)}$$

$$C_P = K\frac{R}{2} + R = (K+2)R \quad \text{(للغازات الجزيئية)}$$

ليس من الغريب أن تكون C_P أكبر دائمًا مـن C_V . فعنـد ثبـوت الضغـط يستـهلك بعض الحرارة في بذل الشغل الخارجي (رفع الكباس فـي الشكـل 1–12 مثـلاً) ، ويستهلك الجزء الباقي في زيادة الطاقة الداخلية ، أي فـي رفـع درجـة الحـرارة . إذن ، كلما كانت الحرارة النوعية كبيرة ، كلما قل التغير في درجة الحرارة لنفس كمية الحرارة المنتقلة .

يرمز للنسبة بين الحرارتين النوعيتين في هاتين العمليتين بالرمز γ ، أي أن :

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \qquad (12\text{–}7)$$

جدول 1-12 : الحرارة النوعية الجزيئية والكتلية للغازات

الغاز	$\frac{C_V}{R}$	$\frac{C_P}{R}$	$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$	$\frac{C_P - C_V}{R}$	$c_v\ (J/kg.K)$
He	1.50	2.49	1.66	0.99	3,130
Ne	1.50	2.46	1.64	0.96	620
Ar	1.50	2.50	1.67	1.00	310
Kr	1.50	2.52	1.68	1.02	150
Xe	1.50	2.49	1.66	0.99	95
Hg (360°C)	1.50	2.50	1.67	1.00	62
O_2	2.48	3.48	1.40	1.00	650
N_2	2.48	3.48	1.40	1.00	740
H_2	2.40	3.39	1.41	0.99	10,000
CO	2.46	3.48	1.41	1.02	730
HCl	2.51	3.54	1.41	1.03	810
CO_2	3.37	4.37	1.30	1.00	640
H_2O (200°C)	3.23	4.23	1.31	1.00	1,500
CH_4	3.24	4.24	1.31	1.00	1,690

عند درجة 15°C لجميع الغازات ما لم ينص على غير ذلك .

يمثل الجدول 1-12 القيم المقاسة عمليًا للحرارتين النوعيتين C_P و C_V والنسبة بينهما γ لعدد من الغازات . لاحظ أن $\gamma = 1.67$ للغازات أحادية الذرة ، وأن القيمة النظرية المعطاة بالمعادلة (7-12) هي $\gamma = \frac{5}{2}/\frac{3}{2} = 1.67$! كذلك فإن قيم γ للغازات الأخرى يمكن استخدامها لحساب قيمة K لكل غاز ، إذ أن معادلاتنا السابقة تبين أن $\gamma = (K+2)/K$. ففي حالة الغازات ثنائية الذرة يلاحظ من الجدول أن $\gamma = 1.40 = \frac{7}{5}$ ؛ وهذا يعني أن $K = 5$. أما بالنسبة للجزيئات المركبة فإن $\gamma = 1.3 = \frac{4}{3}$ ، وهذه القيمة بالنسبة γ تناظر $K = 6$. نستنتج من ذلك إذن أن التجربة تؤيد ما توقعناه سابقًا بأن K عدد صحيح ؛ هذا وسوف نعود مرة أخرى إلى مناقشة معنى قيمة K في القسم 8-12.

وكاختبار آخر لصحة المعادلات السابق اشتقاقها للحرارتين النوعيتين للغازات يمكننا استخدام العلاقة الآتية :

$$C_P - C_V = R \qquad \text{أو} \qquad \frac{C_P}{R} - \frac{C_V}{R} = 1$$

وبالرجوع إلى العمود قبل الأخير في الجدول 1-12 سنجد أن هذا صحيح لجميع الغازات .

مثال توضيحى 2-12

احسب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 2.00 moles من غـاز الـهيليوم He من درجة 20.0° إلى 50.0°C باسـتخدام (أ) عملية ثابتة الحجم ، (ب) عملية ثابتة الضغط . كرر هذه الحسابات لغاز ثانى أكسيد الكربون CO_2 .

المعادلات المناسبة فى هذا الموقف هى :

بالنسبة للجزء (أ) : $Q = nC_V \Delta T$

بالنسبة للجزء (ب) : $Q = nC_P \Delta T$

وبالرجوع إلى الجدول 1-12 نجد أن $C_V = 1.50\,R$ و $C_P = 2.49\,R$ فى حالة الهليوم He . إذن ، بالنسبة إلى الـهليوم :

(أ) $Q = (2.00\text{ mol})(1.50)(8.315\text{ J/mol.C}°)(3.0.0°\text{C}) = 748\text{ J}$

(ب) $Q = (2.00\text{ mol})(2.49)(8.315\text{ J/mol.C}°)(3.0.0°\text{C}) = 1240\text{ J}$

وحيث أن الارتفاع فى درجة الحرارة متساو فى الحالتين ، إذن لابد أن يكون التغير فى الطاقة الداخلية واحدًا أيضًا : $\Delta U = 748\text{ J}$. معنى ذلك إذن أن كمية الحـرارة الزائدة فى الجزء (ب) قد استهلكت فى بذل الشغل أثناء التمدد .

أما فى حالة ثانى أكسيد الكربون فإن $C_V = 3.37\,R$ و $C_P = 4.37\,R$. وهكـذا فإن كميتى الحرارة المطلوب حسابهما فى هاتين العمليتين تكونان كالتالى :

(أ) $$Q = \left(\frac{3.37}{1.50}\right)(745\text{ J}) = 1680\text{ J}$$

(ب) $$Q = \left(\frac{4.37}{2.90}\right)(1242\text{ J}) = 2180\text{ J}$$

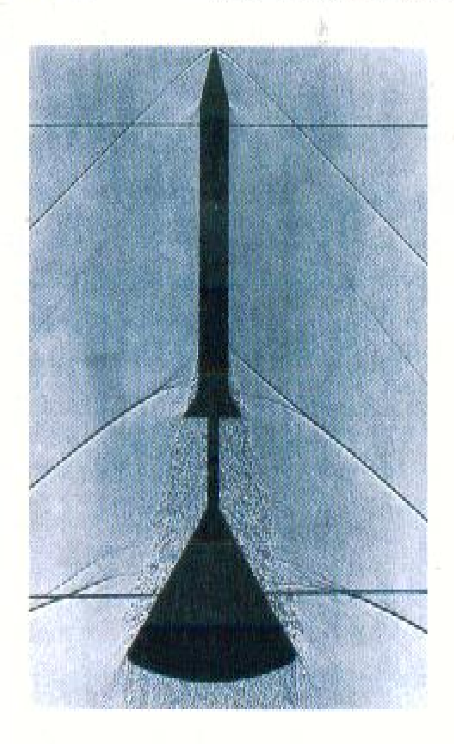
لاحظ هنا أيضًا أن الفرق بين كميتى الحـرارة السـابقتين ، وقدره 500 J يمثل الطاقة المتاحة لبذل الشغل أثناء التمدد ، وهو يساوى تقريبًا نفس قيمته فـى حالـة الـهيليوم . ولكن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة ثانى أكسيد الكربون أكبر من قيمتـها فـى حالة الـهليوم وذلك لأن الجزيئات تمتص بعض الطاقة الإضافية نتيجة لدورانها .

6-12 العمليات الديناميكية الحرارية النمطية فى الغازات

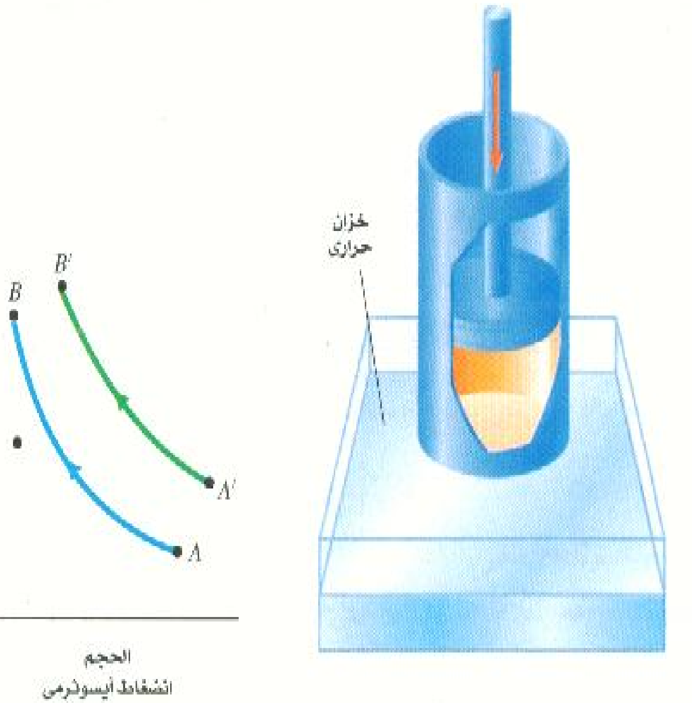
عندما نرسم الرسم البيانى PV ، الذى يمثل ببساطة كيفية تغير P مـع V ، يفترض أن التغيرات التى تحدث فى النظام بطيئة بدرجة كافية لكى يصبح الضغط ودرجة الحـرارة منتظمين فى جميع أجزاء النظام فى أية لحظة .

وقد ناقشنا سابقًا عمليتين تحدث التغـيرات فـى النظـام خلالـهما مـع بقـاء إحـدى الكميات الديناميكية الحرارية ثابتة . أولى هاتين العمليتـين هـى العمليـة **ثابتـة الحجـم** (والتى تسمى أحيانًا بالعملية **الأيسوكورية**) ، وهـذه العمليـة تمثـل بخـط رأسـى فـى الرسم البيانى PV . أما العملية الثانية فهى العملية ثابتة الضغط (**أو الأيسـوبارية**) ،

والتى تمثل بخط أفقى فى الرسم البيانى PV . لنتعرف الآن على عمليتين أخريين تتمان فى النظام عند ثبوت بعض الكميات الديناميكية الحرارية الأخرى .



توضح هذه الصورة الفوتوغرافية التغير الحادث فى الكثافة خلال موجة صدمية فى نفق رياح فوق صوتى . وأحيانا يكون التضاغط الأدياباتى (لماذا أدياباتى ؟) من الشدة بحيث يصبح الغاز خلف الموجة مضيئا وهذا ما نشاهده مثلا فى الموجات الصدمية الناتجة عن تفجير المفرقعات .



شكل 6-12 :
الرسم البيانى PV لانضغاط أيسوثرمى . الأيسوثرم $A'B'$ يمثل العلاقة بين الضغط والحجم عند درجة حرارة أعلى من AB . لماذا ؟

العملية ثابتة درجة الحرارة (الأيسوثرمية)

يقال أن العملية أيسوثرمية إذا تغيرت حالة النظام عند ثبوت درجة حرارته*

* عند رسم المنحنى PV يفترض أن التغيرات التى تحدث فى النظام بطيئة بدرجة كافية لكى يكون الضغط ودرجة الحرارة منتظمين فى كل أجزاء النظام عند أية لحظة .

وحيث أن الطاقة الداخلية تعتمد على درجة الحرارة فقط ، إذن $\Delta U = 0$ أثناء العملية الأيسوثرمية . وفى هذه الحالة يتحول القانون الأول إلى الصورة :

$$Q = W \quad \text{(للعملية الأيسوثرمية)} \tag{12-8}$$

وهكذا فإن كل الحرارة المضافة تستهلك فى بذل الشغل أثناء التمدد الأيسوثرمى . والعكس صحيح أيضًا ، فإن الشغل المبذول على الغاز أثناء الانضغاط الأيسوثرمى سوف يفقد كحرارة إلى الوسط المحيط . ويمثل الشكل 6-12 أ وعاء يحتوى على كمية من غاز مثالى فى حالة تلامس حرارى جيد مع خزان حرارى (فرن أو حمام تبريد أو جهاز آخر يمكنه أن يمد الغاز بالحرارة أو يستقبلها منه مع بقاء درجة حرارته ثابتة) . فإذا وضعت الأثقال ببطء شديد على الكباس سوف يزداد ضغط الغاز ويقل حجمه ببطء شديد .

وحيث أن قانون الغاز المثالى ينص على أن حاصل الضرب PV يساوى مقدارًا ثابتًا عند ثبوت درجة الحرارة ، فإن هذا يعنى بالتالى أن P يتناسب **عكسيًا** مع V أثناء العملية الأيسوثرمية :

$$PV = \text{constant}$$

أو :

$$P = \frac{\text{constant}}{V} \quad \text{(للعملية الأيسوثرمية والغاز المثالى)} \tag{12-9}$$

هذه المعادلة تعطينا مسار العملية الأيسوثرمية (والذى يسمى **أيسوثرم**) فى الرسم البيانى PV ، والموضح بالشكل 6-12 ب . ويجب أن يلاحظ هنا أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الأيسوثرم ، كلما بعد موضعه بالنسبة إلى محورى الإحداثيات ؛ فالأيسوثرم الأخضر $A'B'$ فى الشكل 6-12 ب يمثل درجة حرارة أعلى من الأيسوثرم الأزرق AB .

من الممكن اشتقاق تعبير للشغل المبذول أثناء العملية الأيسوثرمية باستخدام طرق حساب التفاضل والتكامل . ونظرًا لأن اشتقاق هذه العلاقة فوق المستوى الرياضى المطلوب لهذا المقرر ، فإننا سنكتب النتيجة النهائية هنا بدون برهان :

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad \text{(للعملية الأيسوثرمية والغاز المثالى)}$$

حيث T هى درجة الحرارة المطلقة للأيسوثرم ، V_f و V_i هما الحجمان النهائى والابتدائى للغاز ؛ أما الدالة ln فتمثل اللوغاريتم الطبيعى (انظر الملحق 3) . ويلاحظ أن هذا التعبير الرياضى يعطى الشغل بالإشارة الصحيحة . ذلك أن ln أى عدد أصغر من 1 يكون سالبًا ، وهذه هى حالة انضغاط الغاز ، حيث $V_f < V_i$.

العملية صفرية الانتقال الحرارى

عمليتنا الرابعة هى تلك العملية التى تتغير فيها الحالة الديناميكية الحرارية للنظام **بدون تبادل حرارى** بين النظام والوسط المحيط ، وتعرف **بالعملية الأدياباتية** . فمثلاً ، إذا عزل النظام عزلاً حراريًا جيدًا عن الوسط المحيط يمكن عادة إهمال أى تبادل حرارى

بينهما ، وبذلك تكون جميع العمليات التى تحدث داخل النظام عمليات أدياباتية . كذلك إذا أجريت العملية بسرعة فائقة (كالانضغاط الفجائى السريع لغاز مثلاً) ، فإن كمية الحرارة التى تنتقل من أو إلى النظام خلال تلك الفترة الزمنية القصيرة تكون صغيرة جدًا بحيث يمكن إهمالها . وعليه فإن تلك العملية تكون أدياباتية أيضًا .

بناء على ذلك يمكننا أن نفترض أن $Q = 0$ فى العمليات الأدياباتية ، وفى هذه الحالة يأخذ القانون الأول $Q = \Delta U + W$ الصورة :

$$\Delta U = -W \quad \text{(للعمليات الأدياباتية)} \tag{12-10}$$

هذه العلاقة تبين لنا أنه **إذا بذل النظام شغلاً أدياباتيًا لابد أن تقل طاقته الداخلية** ، وذلك لأن الشغل يبذل عندئذ على حساب الطاقة الداخلية . أما إذا كان الشغل الأدياباتى مبذولاً على النظام فإن الطاقة الداخلية تزداد فى هذه الحالة . هذا وسوف نتعرف فى المثال التوضيحى 3-12 والمثال 1-12 على استخدامين عمليين للعمليات الأدياباتية . أما الآن فإننا سنناقش السلوك الأدياباتى للغاز المثالى ببعض التفصيل .

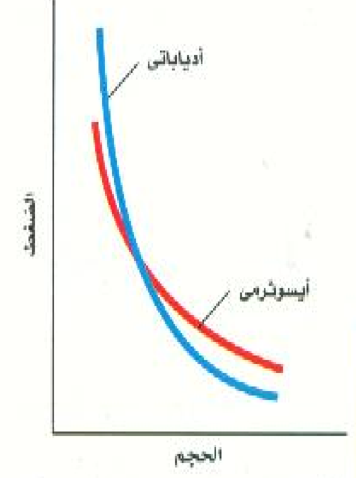
فى حالة الغاز المثالى لا توصف العملية الأدياباتية بدلالة القانون $PV = nRT$ وحده لأن متغيرات الحالة الثلاثة (P, V, T) تتغير جميعها أثناء العملية . ومن ثم تلزمنا معادلة أخرى بين نفس هذه المتغيرات فى حالة العمليات الأدياباتية . ويمكن استنتاج هذه المعادلة بملاحظة أن الشغل المبذول على الغاز يستغل بأكمله فى زيادة الطاقة الداخلية . وهذه الزيادة فى الطاقة الداخلية تسبب بدورها تغير درجة حرارة الغاز . ولكن نفس هذا التغير فى درجة الحرارة يمكن أن يتحقق بإضافة الطاقة إلى النظام . ومن ثم فإنه من الممكن إيجاد علاقة بين كمية الحرارة والتغير فى درجة الحرارة والشغل حتى فى حالة العملية الأدياباتية . وفى حالة الغاز المثالى سوف يؤدى بنا هذا الأسلوب فى التفكير إلى النتيجة الآتية :

إذا تغيرت حالة غاز مثالى بعملية أدياباتية من P_1 , V_1 , T_1 إلى P_2 , V_2 , T_2 فإن :

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma} \tag{12-11}$$

حيث $\gamma = C_P / C_V$ للغاز .

ويمكن كتابة هذه العلاقة الأدياباتية على الصورة $P = \text{constant} / V^{\gamma}$. وحيث أن $\gamma > 1$ دائمًا ، فإن P يقل بزيادة V فى العملية الأدياباتية بمعدل أسرع مما فى العملية الأيسوثرمية $P = \text{constant} / V$ ؛ وهذا موضح بالشكل 7-12 .



شكل 7-12:
مقارنة بين التغير الأدياباتى والتغير الايسوثرمى .

مثال 1-12 :

فى أسطوانة محرك الديزل يضغط الهواء فجأة (ومن ثم أدياباتيًا) بواسطة الكباس ، وتؤدى هذه العملية إلى ارتفاع درجة حرارته . وتكون درجة الحرارة الجديدة عالية بدرجة كافية لإشعال الوقود المحقون دون الحاجة إلى استعمال شمعات الإشعال . لنفرض

أن الكباس يضغط الهواء بحيث يصبح حجمه النهائي جزءًا واحدًا من خمسة عشرة جزء من قيمته الابتدائية . فإذا كان الضغط الابتدائي $P_1 = 1.0\ \text{atm}$ ودرجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 27.0°C$ ، أوجد الضغط P_2 ودرجة الحرارة T_2 النهائيتين .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن استخدام قانون الغاز المثالى ؟

الإجابة : نعم ، ولكن سيكون لدينا مجهولان هما P_2 ، T_2 . ومن ثم فإننا نحتاج إلى علاقة ثانية ، علاقة تعتمد على العملية التى تتغير بها حالة الغاز .

سؤال : ما هو الشرط الذى ينطبق على العملية الأدياباتية ؟

الإجابة : $PV^{\gamma} = \text{constant}$ ، وبذلك يمكننا كتابة :

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$$

لاحظ أن P_2 هو المجهول الوحيد فى هذه المعادلة لأن النسبة بين الحجمين النهائى والابتدائى معطاة بالمسألة $(V_2 = V_1/15)$. وبالرجوع إلى الجدول 1-12 نجد أن $\gamma = 1.40$ لكل من O_2 و N_2 ، وهما الغازان المكونان للهواء فى الأسطوانة . وبناء على ذلك يمكننا كتابة :

$$P_2 = P_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = (1.00\ \text{atm})\left(\frac{15}{1}\right)^{1.40}$$

سؤال : كيف يمكن استخدام قانون الغاز المثالى لإيجاد T_2 بعد تعيين P_2 ؟ أليس عدد المولات n مجهولاً ؟

الإجابة : أبسط طريقة للخروج من هذا المأزق هى استخدام قانون الغاز المثالى فى صورة نسبة كما يلى :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$$

سؤال : بأى وحدات يجب التعبير عن درجتى الحرارة فى هذه العلاقة ؟

الإجابة : يجب دائمًا أن تكون درجة الحرارة فى قانون الغاز المثالى هى درجة الحرارة المطلقة .

الحل والمناقشة : يجب استخدام آلة حاسبة تحتوى على المفتاح x^y . لحساب $(15)^{1.4}$ إدخل 15 واضغط المفتاح x^y ثم إدخل 1.4 واضغط المفتاح = ، وعندئذ ستحصل على 44.3 . إذن :

$$P_2 = (44.3)P_1 = 44.3\ \text{atm} = 4.48 \times 10^6\ \text{Pa}$$

وباستخدام هذه القيمة لحساب T_2 نحصل على :

$$T_2 = T_1\ \frac{44.3}{1}\ \frac{1}{15} = 2.95\ (T_1) = 2.95(300\ \text{K}) = 886\ \text{K} = 613°\text{C}$$

وهذه درجة حرارة عالية بدرجة كافية لإشعال خليط الوقود والهواء .

تمرين : ماذا ستكون قيمة الضغط النهائى إذا ضغط الغاز أيسوثرميًا إلى حجم قدره 1/15 من حجمه الابتدائى ؟ **الإجابة** : 15 atm .

جدول 2-12 : ملخص للعمليات الديناميكية الحرارية (فى حالة الغاز المثالى أحادى الذرة)

العملية	الثابت	الانتقال الحرارى (Q)	الشغل المبذول (W)	التغير فى الطاقة الداخلية (ΔU)	شكل القانون الأول
أيسوبارية	P(or V/T)	$nC_P\Delta T$	$P\Delta V$	$\frac{3}{2}nR\Delta T$	$Q=\Delta U+P\Delta V$
ثابتة الحجم (أو أيسوكورية)	V(or T/P)	$nC_V\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T$	0	$\frac{3}{2}nR\Delta T$	$Q=\Delta U$
أيسوثرمية	T(or PV)	$nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$	$nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$	0	$Q=W$
أدياباتية	PV^{γ}	0	$-\frac{3}{2}nR\Delta T$	$\frac{3}{2}nR\Delta T$	$\Delta U=-W$

12-7 تطبيقات القانون الأول

ينطبق القانون الأول على جميع العمليات الديناميكية الحرارية الممكنة ، والتى تربط الكميات الثلاث Q و W و ΔU . ولقد ناقشنا أربعة عمليات للغازات المثالية يمكن فيها حساب هذه الكميات الثلاث بسهولة ، ويمثل الجدول 2-12 تلخيصًا لنتائج هذه الحسابات . ويتمثل أحد أهدافنا فى هذه الدراسة فى اكتساب القدرة على حساب Q و W و ΔU لأية عملية قد نتعامل معها . فإذا أمكننا إيجاد أى **اثنتين** منها يمكن حساب الكمية الثالثة الباقية . أما إذا أعطى لنا وصف العملية فى صورة مسار مثل AB فى الرسم البيانى PV فعلينا اتباع الآتى :

1 ـ يمكن إيجاد الشغل (W_{AB}) دائمًا بتعيين المساحة الواقعة تحت المسار AB . وإذا كان AB مكونًا من خطوط مستقيمة ، فإن هذه الخطوة تؤول إلى حساب مساحات مثلثات أو مستطيلات . أما إذا كان AB مسارًا منحنيًا فيمكن رسم المنحنى على ورقة رسم بيانى ثم عد المربعات تحت المنحنى .

2 ـ فى حالة الغازات المثالية ، يمكن إيجاد درجة حرارة أى حالة (أى نقطة فى الرسم البيانى PV) من قانون الغاز المثالى ، أى يمكن حساب T_A و T_B . وحيث أن الطاقة الداخلية **لا تعتمد على العملية التى تتغير بها الحالة ، بل تعتمد فقط على درجتى الحرارة عند النقطتين A و B** ، يمكننا حساب ΔU من المعادلة (3-12) :

$$\Delta U=\frac{3}{2}nR(T_B-T_A) \quad \text{(للغاز أحادى الغاز)}$$

3 ـ يمكن استخدام القانون الأول (المعادلة 1-12) . عندئذ لتعيين الحرارة المنتقلة من أو إلى الغاز أثناء العملية ، Q_{AB} :

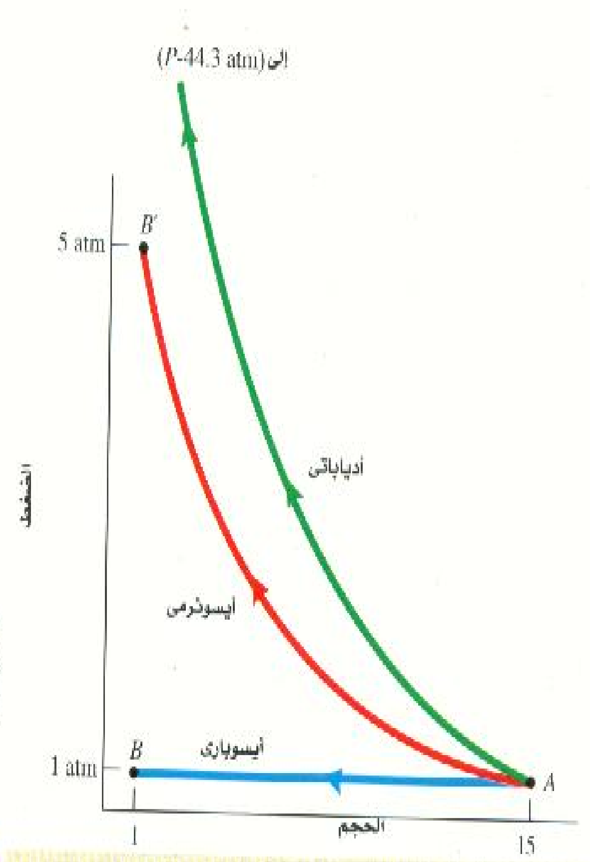
$$Q_{AB} = \Delta U + W_{AB}$$

ويجب أن نتذكر دائمًا استخدام الإشارة الصحيحة بكل من Q و W وتكون الإشارة موجبة إذا كانت الحرارة **مضافة إلى** الغاز وكان الشغل **مبذولاً بواسطة** الغاز (تمدد) . أما الإشارة السالبة فتستخدم عندما تكون الحرارة **مفقودة** بواسطة الغاز وعندما يكون الشغل **مبذولاً على** الغاز (انضغاط) .

لنتعرف الآن على طريقة تطبيق هذه القواعد فى بعض الأمثلة .

مثال12-2 :

افترض أن لدينا 1 mol من غاز مثالى أحادى الذرة عند $P_1 = 1$ atm ، $T_1 = 27°C$. احسب كلاً من Q و W و ΔU فى الحالات الآتية : (أ) الانضغاط الأدياباتى ، (ب) الانضغاط الأيسوثرمى ، (جـ) الانضغاط الأيزوبارى ؛ بفرض أن الحجم النهائى فى كل حالة خمس الحجم الابتدائى . هذه العمليات الثلاث موضحة بالشكل 8-12 .



شكل 8-12:
ثلاثة انضغاطات من نفس الحالة الابتدائية إلى نفس الحجم النهائى .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى أسهل كمية يمكن أن نبدأ بها ؟

الإجابة : يمكن حساب ΔU إذا علمنا درجتى الحرارة الابتدائية والنهائية . ويمكن أيضًا حساب الشغل إما باستخدام المعادلة الرياضية الخاصة بذلك أو بإيجاد المساحة تحت المسار فى الرسم البيانى PV . وبتطبيق القانون الأول يمكن بعدئذ تعيين Q .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى للتغير فى الطاقة الداخلية ΔU ؟

الإجابة : $\Delta U = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1)$ للغاز المثالي في كل الحالات .

سؤال : ما هي درجة الحرارة النهائية في كل من الحالات الثلاث ؟

الإجابة :

(أ) ارجع إلى حسابات العملية الأدياباتية فـي المثـال 1-12 ، مـع ملاحظـة أن مثالنا الحالي يختص بغاز أحادى الذرة ، حيث 1.67 = γ (من الجـدول 1-12) . وبنـاء علـى ذلك سنجد أن :

$$P_2 = P_1 \left(\frac{5}{1}\right)^{1.67} = (1\text{ atm})(14.7) = 14.7\text{ atm}$$

ومنه :

$$T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1}\frac{V_2}{V_1} = (14.7)\left(\frac{1}{5}\right) = 2.94\,T_1 = 882\text{ K}$$ (للانضغاط الأدياباتي)

(ب) في الحالة الأيسوثرمية :

$$T_2 = T_1 = 27°\text{C} = 300\text{ K}$$ (للانضغاط الأيسوثرمي)

(جـ) فـي الحالـة الأيسـوبارية T تتناسـب مـع V ، لأن P ثـابت . إذن ، إذا كـان $V_2 = V_1/5$ ، فإن :

$$T_2 = \frac{T_1}{5} = 60\text{ K}$$ (للانضغاط الأيزوباري)

سؤال : ما قيمة التغير في الطاقة الداخلية في كل حالة ؟

الإجابة :

(أ) للانضغاط الأدياباتي :

$$\Delta U = \frac{3}{2}\,nR\Delta T$$

$$= \frac{3}{2}\,(1\text{ mol})(8.314\text{ J/mol.K})\,(882\text{ K} - 300\text{ K}) = +7260\text{ J}$$

(ب) للانضغاط الأيسوثرمي : $\Delta U = 0$ لأن $\Delta T = 0$.

(جـ) للانضغاط الأيسوباري :

$$\Delta U = = \frac{3}{2}\,(1\text{ mol})(8.314\text{ J/mol.K})\,(20\text{ K} - 300\text{ K}) = -3490\text{ J}$$

سؤال : ما هي المعادلات التي تعطي الشغل المبذول في كل حالة ؟

الإجابة : من الجدول 2-12 نجد أن :

(أ) $W = -\Delta U = -7260\text{ J}$ (للانضغاط الأدياباتي)

(ب) $W = nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$ (للانضغاط الأيسوثرمي)

$$= (1)\,(8.314\text{ J/mol.K})\,(300\text{ K})\ln\left(\frac{1}{5}\right) = -4010\text{ J}$$

(جـ) $W = P(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1)$ (للانضغاط الأيسوبارى)

$= (1)\ (8.314\ J/mol.K)\ (20\ K - 300K) = -2330\ J$

سؤال : ما هى معادلات الانتقال الحرارى ؟

الإجابة :

(أ) $Q = 0$ (للانضغاط الأدياباتى)

(ب) $Q = W = -4010\ J$ (للانضغاط الأيسوثرمى)

(جـ) $Q = \Delta U +$ (للانضغاط الأيسوبارى) W (للانضغاط الأيسوبارى)

$= \Delta U + P\Delta V = \Delta U + nR\Delta T$

$= -3490\ J + (-2330\ J) = -\ 5820\ J$

الحل والمناقشة : لاحظ النقاط الهامة الآتية :

1 الإشارة السالبة تدل على أن الشغل مبذول على الغاز فى جميع الحالات الثلاث ، وهذا متوقع لأى نوع من الانضغاط .

2 فى الحالة الأدياباتية يستهلك الشغل بأكمله فى زيادة الطاقة الداخلية .

3 لكى تظل درجة الحرارة ثابتة فى الحالة الأيسوثرمية يجب أن يفقد الغاز كمية من الحرارة تساوى الشغل المبذول على الغاز .

4 تأكد أن كمية الحرارة المفقودة فى الحالة الأيسوبارية تساوى كمية الحرارة المعطاة بالعلاقة $Q = nC_P\Delta T$.

مثال12-3 :

أجريت العملية الديناميكية الحرارية ABC الموضحة بالشكل 9-12 على كمية من غاز الأرجون قدرها 2 mol . عين التغير فى الطاقة الداخلية والشغل المبذول وكمية الحرارة المنتقلة خلال هذه العملية .

استدلال منطقى :

1

سؤال : هل العملية ABC أى من العمليات الأربع السابق مناقشتها ؟

الإجابة : لا ، إذ أن أيًا من المعادلات السابقة التى تعطى Q أو W لا تنطبق على هذه العملية .

سؤال : كيف يمكن تعيين الشغل المبذول ؟

الإجابة : الشغل هو المساحة المحصورة تحت العملية فى الرسم البيانى PV دائمًا .

سؤال : ما هى المساحة المحصورة تحت المسار ABC ؟

الإجابة : المساحة الكلية تساوى مساحة المثلث الأخضر ABC زائد مساحة المستطيل الأحمر تحت الخط AC .

$$\text{المساحة} = W = \frac{1}{2}(0.250 \text{ atm})(50.0 \text{ liters}) + (0.500 \text{ atm})(50.0 \text{ litres})$$

سؤال : كيف نعلم ما إذا كان الشغل مبذولاً بواسطة الغاز أو على الغاز .

الإجابة : بملاحظة ما إذا كانت العملية عملية انضغاط ($\Delta V < 0$) أو تمدد ($\Delta V > 0$) . ويلاحظ أن الغاز يتمدد فى هذه الحالة ، أى أنه يبذل شغلاً ومن ثم فإن المساحة المحسوبة تمثل شغلاً موجبًا .

سؤال : وبما أن هذه العملية ليست بسيطة ، كيف يمكن حساب ΔU ؟

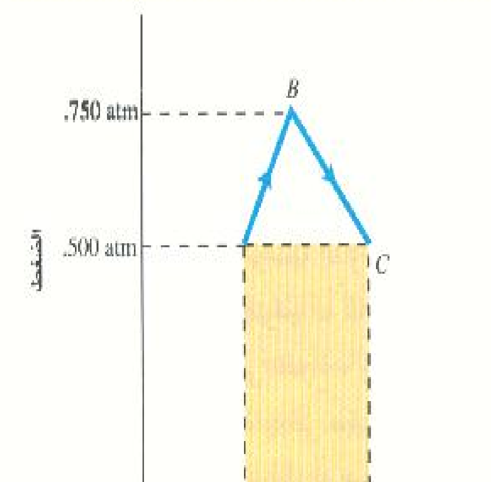
الإجابة : التغير فى الطاقة الداخلية ΔU لا يعتمد على نوع العملية ، إذ أنه يساوى دائمًا $\frac{3}{2}nR\Delta T$ فى حالة الغاز المثالى .

سؤال : كيف تحسب درجتا الحرارة عند النقطتين A و C ؟

الإجابة : باستخدام قانون الغاز المثالى : $T = PV/nR$.

سؤال : ما هى العلاقة المكن استخدامها لتعيين Q_{ABC} ؟

الإجابة : بعد إيجاد W و ΔU يمكن استخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية لحساب Q ، إذ أن : $Q = \Delta U + W$.



شكل 9-12:
العملية الديناميكية الحرارية ABC فى المثال 3-12 .

الحل والمناقشة : بحساب المساحة تحت المسار ABC نحصل على :

$$W = +31.2 \text{ atm . liter} = +3160 \text{ J}$$

درجة الحرارة عند النقطة A هى :

$$T_A = \frac{P_A V_A}{nR} = \frac{(0.500 \text{ atm})(40.0 \text{ liter})}{(2.00 \text{ mol})(0.0820 \text{ atm liter/mol.K})}$$

$$= 122 \text{ K}$$

(لاحظ اختيار R بالوحدات المناسبة) . وحيث أن $P_A = P_C$ ، إذن :

$$T_C = T_A \frac{V_C}{V_A} = (122 \text{ K}) \frac{90.0}{40.0} = 274 \text{ K}$$

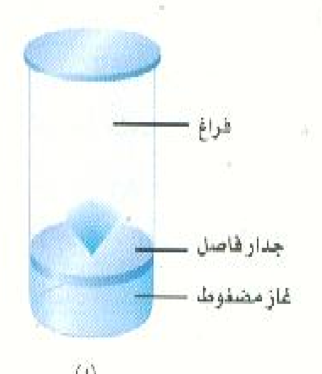
إذن :

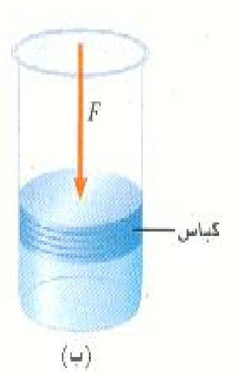
$$\Delta U = \frac{3}{2}(2.00\ \text{mol})(8.314\ \text{J/mol.K})(274\ \text{K} - 122\ \text{K}) = +3790\ \text{J}$$

وطبقًا للقانون الأول فإن كمية الحرارة المنتقلة تساوى ΔU و W :

$$Q = +3790\ \text{J} + 3160\ \text{J} = +6950\ \text{J}$$

وهذه هي كمية الحرارة المضافة إلى الغاز أثناء العملية .





شكل 10-12:
عندما يثقب الفاصل بين الغرفتين ثقبا صغيرا في الجزء (أ) سوف يتمدد الغاز في الفراغ . في الجزء (ب) استبدل الفاصل بكباس قابل للحركة . في هذه الحالة سوف يرتفع الكباس إلى أعلى أثناء تمدد الغاز . في أية حالة يكون تبريد الغاز أكبر ؟

عملية تخفيف الضغط بالخنق

مثال توضيحي 3 -12

يمثل الشكل 10-12 أ إناء معزولاً مقسمًا إلى قسمين يحتوى أحدهما ، وهو الجزء السفلى الصغير ، على غاز تحت ضغط عال ، أما الجزء العلوى الأكبر حجمًا فهو مفرغ تمامًا . ثقبت فتحة صغيرة في الجدار الموصل بين الجزئين بحيث يتمدد الغاز أدياباتيًا في الغرفة المفرغة (أ) صف التغير الناتج في درجة حرارة الغاز . (ب) افترض أن القسم السفلى الصغير مملوء بدلاً من ذلك بسائل تحت ضغط عال يمكنه أن يتبخر عند تمدده في الفراغ . صف تغير درجة حرارة المادة .

استدلال منطقى : تسمى مثل هذه العملية التى يتمدد فيها الغاز خلال فتحة صغيرة أو قرص مسامى ، عملية **تخفيف الضغط بالخنق** . وحيث أن هذه العملية أدياباتية ، فإن القانون الأول يعنى أن $\Delta U = -W$ ، حيث W هو الشغل المبذول بواسطة الغاز .

(أ) المطلوب هو معالجة حالة غاز يمر بهذه العملية ، وسنفترض أنه غاز مثالى . يمكننا عندئذ القول أن الغاز المثالى لا يبذل شغلاً أثناء تمدده فى الفراغ ، وذلك لأن الضغط الذى يقاوم التمدد يساوى صفرًا . إذن $P\Delta V = 0$. وهذا يعنى طبقًا للقانون الأول أن الطاقة الداخلية للغاز لا تتغير . وحيث أن $U \sim T$ ، **فإن درجة حرارة الغاز تظل ثابتة .**

(ب) سوف تختلف النتيجة اختلافًا كبيرًا إذا كانت المادة المضغوطة سائلاً من السوائل التى تتبخر عند تمددها فى الفراغ ، كالبيوتان أو الفريون . فحيث أن طور المادة يتغير أثناء العملية من سائل إلى بخار ؛ إذن لابد أن يستمد السائل حرارة التبخير من أى مصدر متاح للطاقة . ونظرًا لأن العملية أدياباتية فإن السائل لا يمكن أن يستمد الطاقة اللازمة للتبخير من الخارج ، ومن ثم فإن حرارة تبخير كتلة قدرها m من السائل لابد أن تستمد من الطاقة الداخلية للسائل $\Delta U = -mL_V$. ويترتب على ذلك أن يقل متوسط طاقة حركة الجزيئات أثناء التمدد ؛ وعليه فإن درجة حرارة الغاز تصبح أقل من درجة حرارة السائل الأصلى . وهذا يشبه إلى حد كبير عملية التبريد التى تحدث أثناء التبخير .

ومن أشهر الأمثلة المتعلقة بهذه الظاهرة ما يشاهد عند استعمال علب رش الإيروسولات التى تحتوى على سائل تحت ضغط عال . ولعلك تكون قد لاحظت عند

ضغط صمام مثل هذه العلبة ، لكى يسمح لمحتوياتها بالتبخر ، أن الصمام والعلبة يبردان إلى درجة ملحوظة . وبالرغم من أن التمدد يحدث فى هذه الحالة ضد الضغط الجوى وليس فى الفراغ ، فإن تأثير التبريد الناتج عن تغير الحال يكون كبيرًا جدًا . والواقع أن عملية تخفيف الضغط بالخنق ، مع استعمال مواد ذات حرارة تبخير عالية جدًا ، هى أساس عمل جميع أجهزة التبريد ، بما فى ذلك أجهزة تكييف الهواء والثلاجات والمجمدات المنزلية . هذا وسوف نتناول مناقشة مثل هذه الأجهزة بتفصيل أكبر فى الفصل التالى .

وأخيرًا فإن الغاز المثالى ذاته يمكن أن يبرد أثناء التمدد الأدياباتى فى حالات معينة . فمثلاً ، لنفرض أننا استعضنا عن الفاصل بين الغرفتين العلوية والسفلية فى الشكل 12-10 أ بكباس قابل للحركة ، كما هو مبين بالشكل 12-10 ب . فإذا كان القسم العلوى من الإناء يحتوى على هواء عند ضغط أقل من الضغط فى القسم السفلى ، فإن الغاز المتمدد يجب أن يبذل شغلاً ضد هذا الضغط . وطالما كان التمدد أدياباتيًا ، فإن الغاز سوف يبذل هذا الشغل على حساب الطاقة الداخلية للغاز ، مما يؤدى إلى انخفاض درجة حرارته . ■

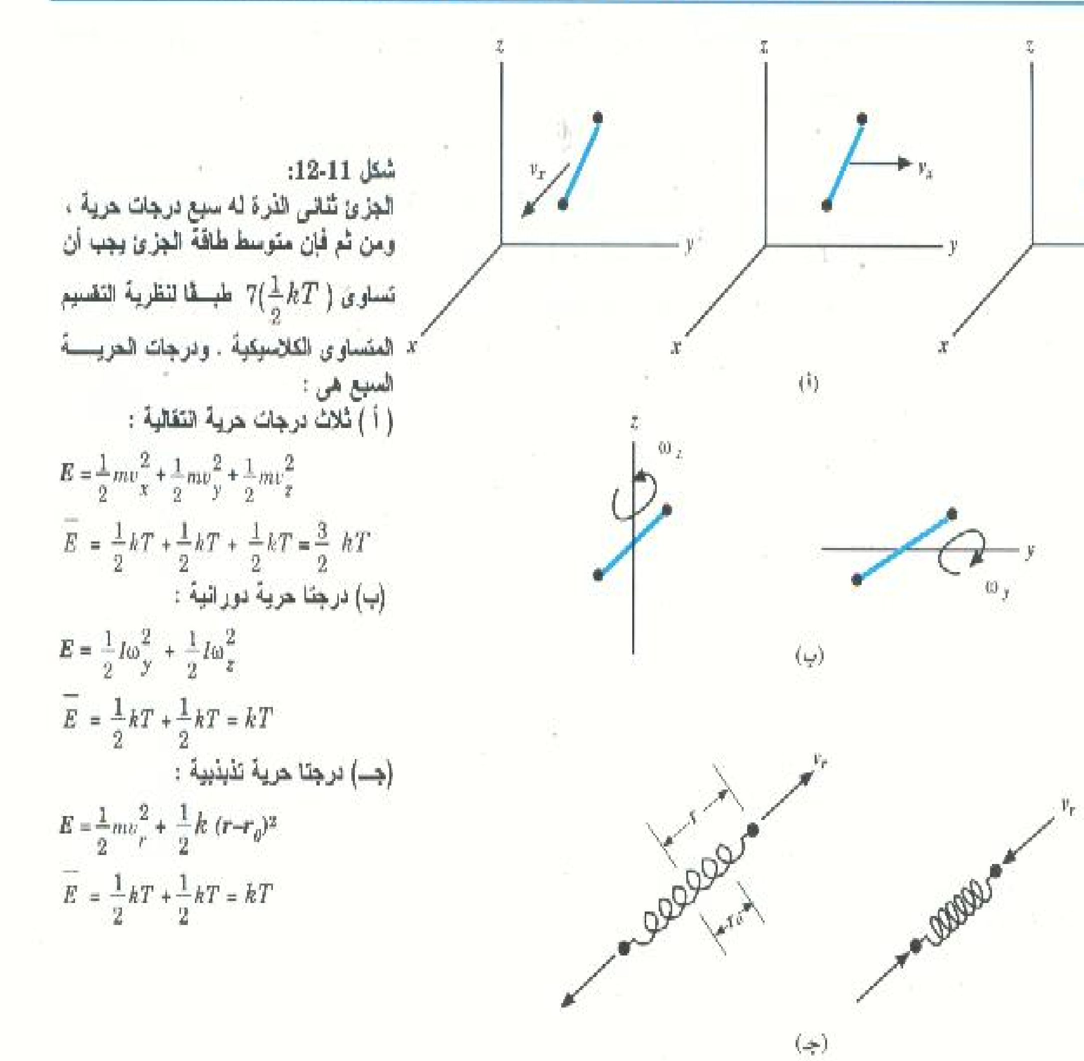
12-8 وجهة نظر حديثة :

اعتماد الحرارتين النوعيتين الجزيئتين للغازات على درجة الحرارة

لاحظنا فى القسم 12-5 أن القيم المقاسة لكل من C_V و C_p للغازات المثالية أحادية الذرة تتفق اتفاقًا جيدًا مع النظرية الكلاسيكية ، كما وجدنا أن النظرية الكلاسيكية لا تتنبأ بأى تغير للحرارتين النوعيتين للغازات المثالية ، سواء كانت أحادية الذرة أما لا ، مع درجة الحرارة . ومع ذلك فقد أثبتت التجربة أن الحرارتين النوعيتين للغازات ثنائية الذرة وعديدة الذرات تعتمد بالفعل على درجة الحرارة ، وأن قيمهما عند درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة لا تتفق مع التنبؤات الكلاسيكية . ولفهم أسباب هذا التناقض علينا أن نلجأ مرة أخرى إلى مفهوم الطاقة التكمية ، وهو الموضوع السابق مناقشته فى القسم 8-5 .

المبدأ الأساسى للاتزان الحرارى هو أن كلاً من مركبات الحركة ، فى الاتجاهات x و y و z ، تساهم بنصيب متساو فى الطاقة الداخلية للغاز ؛ وهذا ما يسمى نظرية **التقسيم المتساوى** للطاقة . وهكذا فإن كلاً من مركبات الحركة الانتقالية للذرة تساهم فى طاقة الحركة الانتقالية $(3kT/2)$ بمقدار الثلث ، أى $\frac{1}{2}kT$ فى المتوسط ؛ وسوف نسمى هذه المركبات المستقلة للحركة **بدرجات حرية الغاز** . ومعنى ذلك أن الغاز أحادى الذرة له 3 درجات حرية ، واحدة لكل من مركبات متجه سرعته الثلاث .

ولمعالجة الغازات الجزيئية فإننا سنقوم بتعميم نظرية التقسيم المتساوى على جميع الحركات المستقلة (درجات الحرية) التى تساهم فى طاقة الجزئ . فالجزيئات الخطية ثنائية الذرة كجزئ الهيدروجين H_2 يمكنها الدوران حول محورين مستقلين متعامدين



شكل 11-12:
الجزئ ثنائى الذرة له سبع درجات حرية ، ومن ثم فإن متوسط طاقة الجزئ يجب أن تساوى ($7(\frac{1}{2}kT$ طبقًا لنظرية التقسيم المتساوى الكلاسيكية . ودرجات الحرية السبع هى :

(أ) ثلاث درجات حرية انتقالية :

$$E = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = \frac{3}{2}\ kT$$

(ب) درجتا حرية دورانية :

$$E = \frac{1}{2}I\omega_y^2 + \frac{1}{2}I\omega_z^2$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = kT$$

(جـ) درجتا حرية تذبذبية :

$$E = \frac{1}{2}mv_r^2 + \frac{1}{2}k\ (r-r_0)^2$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = kT$$

مع الخط الواصل بين الذرتين ، وطبقًا لنظرية التقسيم المتساوى فإن متوسط الطاقة المرتبطة بكل درجة حرية دورانية تساوى $\frac{1}{2}kT$. وعلاوة على ذلك فإن تذبذب الرابطة بين الذرتين يعنى أن للجزئ طاقة حركة وطاقة وضع . ومرة ثانية تتنبأ نظرية التقسيم المتساوى أن متوسط كل من طاقة حركة الجزئ وطاقة وضعه تساوى $\frac{1}{2}kT$.
وبناء على ذلك يمكننا القول أن النظرية الكلاسيكية تتنبأ بأن الطاقة الداخلية للجزيئات الخطية ثنائية الذرة تساوى $7\left(\frac{1}{2}kT\right)$ لكل جزئ فى المتوسط (انظر الشكل 11-12) ؛

إذن فى حالة n moles :

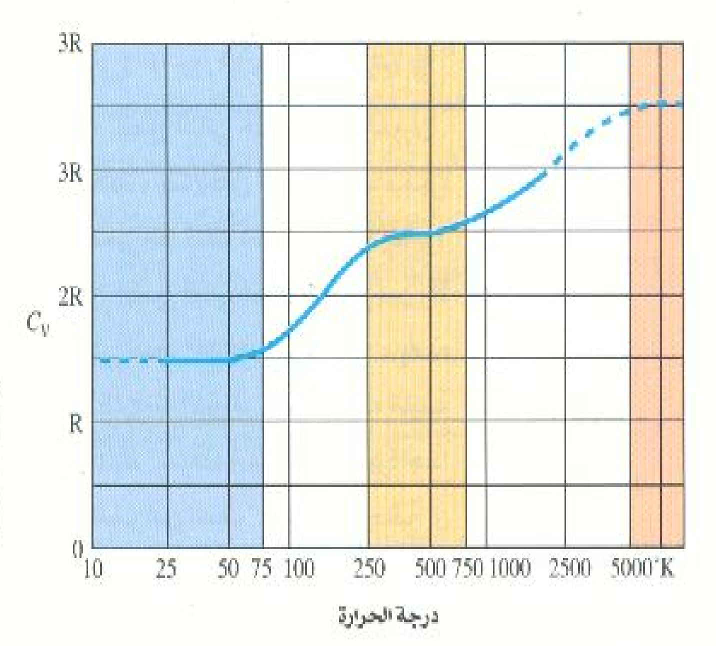
$$U = \frac{7}{2}nRT = nC_V T$$

ومنه :

$$C_V = \frac{7}{2}R \quad \text{و} \quad C_P = C_V + R = \frac{9}{2}R$$

الآن يمكننا تفسير معنى الرمز K المستخدم فى القسم 12-5 ، حيث كتبنا التعبير العام للحرارة النوعية C_V على الصورة $C_V = K(R/2)$ والنسبة γ على الصورة

$\gamma = C_P / C_V = (K + 2)K$. من الواضح إذن أن العدد الصحيح K هو عدد درجات حرية الغاز المتاحة للمشاركة فى الطاقة الحرارية . ففى حالة الغازات أحادية الذرة $K = 3$ ، $\gamma = 5/3 = 1.67$ ، وهذا يتفق مع التجربة . أما بالنسبة للغازات ثنائية الذرة فإن النظرية الكلاسيكية تتنبأ بأن $K = 7$ ، $\gamma = 9/7 = 1.28$ ، ولكن ثبت بالتجربة العلمية أن $\gamma = 1.4$ (الجدول 1-12) لمعظم الغازات ثنائية الذرة ، وهذا يشير إلى أن عدد درجات الحرية خمسة فقط $(K = 5)$. وبالرغم من أن نتائج النظرية الكلاسيكية لا توضح أن اعتماد الحرارتين النوعيتين على درجة الحرارة ، فإن القيمة العملية المقاسة لكل من C_V و C_P تؤكد أنهما تعتمدان على درجة الحرارة فى حالة الغازات الجزيئية .



شكل 12-12:
القيم العملية للحرارة النوعية C_V لغاز الهيدروجين ثنائى الذرة كدالة فى درجة الحرارة . لاحظ التدريج اللوغاريتمى لمحورى الإحداثيات .

لنناقش الآن النتائج العملية لغاز مكون من جزيئات الهيدروجين H_2 . يبين الشكل 12-12 أن C_V لغاز الهيدروجين H_2 عن درجات الحرارة التى تقل عن حوالى 50 K ثابتة وتساوى $(3/2R)$ كما فى حالة الغازات أحادية الذرة ، وتكون $(C_V = 5/2\, R)$ فوق درجة 250 K إلى حوالى 750 K . وأخيرًا تقترب C_V من قيمتها الكلاسيكية $(7/2\, R)$ عند درجات الحرارة التى تزيد عن 5000 K ويستنتج من هذا السلوك أن أنماط الطاقة الدورانية والتذبذبية لا تكون موجودة بالمرة عند درجات الحرارة المنخفضة جدًا (50 K) ، وأن اثنان فقط من هذه الأنماط ينشطان فى مدى درجات الحرارة المتوسطة . أما من وجهة النظر الكلاسيكية فإن مبدأ التوزيع المتساوى للطاقة يعنى ضمنيًا أن التصادمات الجزيئية تعمل على توزيع الطاقة الداخلية توزيعًا متساويًا بين جميع درجات الحرية لا يعتمد على درجة الحرارة .

ظل سلوك C_V الذى يتناقض تناقضًا واضحًا مع النظرية الكلاسيكية لغزًا محيرًا إلى أن استطاع أينشتين تفسيره فى عام 1907 . ومرة أخرى فإن تفسير هذا السلوك يتطلب مراجعة الفروض الأساسية للنظرية الكلاسيكية . رأينا سابقًا (القسم 5-8) أن النظرية الكلاسيكية تفترض أنه ليس هناك أى حدود « لمدى صغر » كمية التحرك الزاوى للجسم

الدائر ، وقد رأينا أيضًا أن هذا الفرض يجب نبذه تمامًا فى حالة الأجسام ذات الأبعاد الذرية . ذلك أن خبرتنا مع الأجسام الماكروسكوبية الدائرة لا تدل إطلاقًا على أن هذا الفرض قد يكون موضع شك . فعجلة السيارة مثلاً يمكنها أن تدور بمعدل أبطأ فأبطأ وبصورة ملساء مستمرة أثناء تقاصر السيارة إلى أن تتوقف تمامًا . وبالمثل ، فليس هناك فى خبرتنا مع الأنظمة المتذبذبة ، كالزنبرك والبندول ، ما يحملنا على الاعتقاد بأن هناك حدًا يختلف عن الصفر فيما يتعلق بالتردد الأدنى الممكن للتذبذب . ومن الغريب حقًا أن أكثر الفروض « وضوحًا » تكون هى الأصعب اختبارًا فى معظم الأحيان .

ذكرنا كذلك فى القسم 5–8 أن كمية التحرك الزاوى للأجسام الدائرة فائقة الصغر ظاهرة تكمية ، وأن كم كمية التحرك الزاوى يساوى $(L_1 = h/2\pi)$. هذا يعنى أن الطاقة الدورانية الدنيا لمثل هذه الأجسام تعطى بالعلاقة $E_1(\text{rot}) = L_1^2 2I = h^2/8\pi^2 I$. حيث h ثابت بلانك $(6.62 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$ و I عزم القصور الذاتى حول محور الدوران . لاحظ أن ثابت بلانك h يظهر مربعًا فى هذه العلاقة ، مما يجعل قيمة البسط صغيرة جدًا . ومع ذلك فإن عزم القصور الذاتى للجزيئات صغير جدًا كذلك لأنه يتضمن كتلاً صغيرة جدًا ومسافات صغيرة جدًا بين الذرات . فمثلاً ، عزم القصور الذاتى لجزئ الهيدروجين H_2 حول محور عمودى على الرابطة بين الذرتين H فى حدود $I \approx 10^{-47}\ \text{kg m}^2$ ، وهذه قيمة متناهية الصغر بالمقاييس الماكروسكوبية . ولذلك فعند التعويض عن I بهذه القيمة فى معادلة $E_1(\text{rot})$ سنحصل على $E_1(\text{rot}) \approx 10^{-21}\ \text{J}$ ، وهذه أيضًا كمية صغيرة جدًا بالمقياس الماكروسكوبى بحيث لا نحس أنها تختلف عن الصفر . ولكن بملاحظة أن ثابت بولتزمان ، الذى يحدد كمية الطاقة الحرارية المتاحة لكل درجة حرية ، أصغر كثيرًا من ذلك (فى حدود $10^{-23}\ \text{J/k}$) ، يمكننا أن نجد من هذا المنظور أن كم الطاقة الدورانية لجزئ H_2 يبدو كبيرًا حقًا ، ويساوى kT تقريبًا عندما $T = 100\ \text{K}$.

وفى عام 1907 افترض أينشتين أن الطاقات الممكنة لجزئ متذبذب يمكن أن تكون تكمية أيضًا ، بمعنى أن الطاقات التذبذبية لا يمكن أن تكون صغيرة بلا حدود ، بل إنها تساوى مضاعفات لكمية أساسية من الطاقة لا يمكن تقسيمها . كذلك افترض أينشتين أن كم الطاقة التذبذبية يتناسب مع تردد التذبذب f وأن ثابت التناسب يساوى ثابت بلانك . ويمكن التعبير عن ذلك رياضيًا بالمعادلة $E_{osc} = n(hf)$ ، حيث n عدد صحيح و $(h = 6.62 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$ أو J/Hz) مرة ثانية . وطبقًا لهذه الفكرة فإن **طاقة التذبذب لا يمكن أن تكون أصغر من** $E_1(vib) = hf$. وفى حالة التذبذبات الماكروسكوبية الكبيرة تكون الترددات من الصغر بحيث تصبح hf كمًا صغيرًا جدًا ، أى أنه يمثل كمية متناهية الصغر من الطاقة يستحيل قياسها . أما فى حالة الاهتزازات الجزيئية ذات الترددات العالية جدًا فإن الكمية hf تمثل « كتلة كبيرة » من الطاقة على هذا المقياس .

لنحاول الآن أن نرى كيف يمكن تفسير سلوك الحرارتين النوعيتين باستخدام مفهوم كمات الطاقة الدورانية والاهتزازية . ويجب أن نتذكر بداية أن التصادمات بين الجزيئات هى التى تسبب توزيع الطاقة الحرارية توزيعًا إحصائيًا بين أنماط الطاقة

الجزيئية المختلفة ، وأن متوسط الطاقة المتبادلة بين الجزيئات المتصادمة يساوى kT تقريبًا . هذه الطاقة تكون صغيرة جدًا عند درجات الحرارة فائقة الانخفاض . فإذا كانت درجة حرارة الغاز منخفضة جدًا فإن الطاقة المتبادلة فى تصادم متوسط ($=kT$) تكون أصغر من كم الطاقة الدورانية ($h^2/8\pi^2I$) ، وبذلك لن تكون كافية لأن يبدأ الجزئ فى الدوران على الإطلاق . وعليه ، فإذا كانت درجة الحرارة أقل من

$$T_{rot} = \frac{h^2}{8\pi^2 Ik} \qquad \text{أو} \qquad kT_{rot} = \frac{h^2}{8\pi^2 I}$$

تقريبًا ، ستكون درجتا الحرة الدورانيتان « متجمدتين » ولن تساهما فى الحرارة النوعية للغاز ، ويوضح الجدول 3-12 بعض قيم T_{rot} لاحظ أن T_{rot} لجزئ H_2 تتفق تمامًا مع مناقشتنا السابقة التى قمنا فيها بحساب $E_1(\text{rot})$.

وبالمثل ، عندما تكون درجة حرارة الغاز منخفضة بدرجة كافية لأن تكون الطاقة المتنقلة kT فى تصادم متوسط أقل من الكم hf اللازم لاهتزاز الرابطة بين الذرتين ، فإن التصادمات المتوسطة لن يمكنها « تنشيط » الاهتزازات الجزيئية ، وبذلك لن يشارك النمطان الاهتزازيان للطاقة فى الحرارة النوعية . هذا يعنى إحصائيًا أنه ما لم تصل درجة حرارة الغاز إلى

$$T_{vib} = \frac{hf}{k} \qquad \text{أو} \qquad kT_{vib} = hf$$

ستكون درجتا الحرية الاهتزازيتان « متجمدتين » ؛ ويمكن أيضًا أن تجد أمثلة لدرجة الحرارة T_{vib} بالجدول 3-12 .

وتلخيصًا لما سبق نقول أن النظرية الكلاسيكية تفترض أن جميع درجات الحرية الممكنة للطاقة الداخلية تساهم دائمًا بنصيب متساوٍ قدره ($\frac{1}{2}kT$) فى الطاقة الحرارية . وحيث أن عدد درجات الحرية للغازات المثالية ثنائية الذرة سبعة ، فإن الحرارة النوعية طبقًا للنظرية الكلاسيكية يجب أن تكون $C_V = 7(kT/2)$ بصرف النظر عن درجة الحرارة . أما النظرية الكمية الحديثة فتقتضى وجود « عتبة » لدرجات الحرارة اللازمة لتنشيط أنماط الطاقة التكممية ، وإسهامًا بالتالى فى الحرارة النوعية . ومن جهة أخرى فإن الحركة الانتقالية ليست تكممية ، ولذلك تكون درجات الحرية الانتقالية الثلاث لجميع الغازات نشطة عند أى درجة حرارة أعلى من $T = 0\ \text{K}$ ، ولهذا تكون $C_V = \frac{3}{2}R$ لجميع الغازات عند درجات الحرارة فائقة الانخفاض ، وهذا المدى من درجات الحرارة موضح بالجزء الأزرق فى الشكل 12-12 . وعندما تقترب T أكثر فأكثر من T_{rot} ، تزداد تدريجيًا نسبة التصادمات التى يمكنها تنشيط درجتى الحرية الدورانيتين فى الجزيئات ثنائية الذرة ، ولهذا يلاحظ أن السعة الحرارية C_V تتغير تدريجيًا مع درجة الحرارة من ($\frac{3}{2}R$) إلى ($\frac{5}{2}R$) ؛ وهذا موضح بالجزء الأصفر فى الشكل 12-12 . وعندما تقترب T من T_{vib} سنجد أن C_V تمر بمنطقة انتقالية أخرى نتيجة للزيادة المطردة فى نسبة التصادمات القادرة على تنشيط الاهتزازات الجزيئية . وبزيادة درجة الحرارة فوق T_{vib} (الجزء الأحمر بالشكل 12-12) تصل الحرارة النوعية للغاز ثنائى

جدول 3-12:
درجات حرارة تنشيط الطاقة الدورانية والاهتزازية للجزيئات ثنائية الذرة .

T_{rot}(K)	T_{vib}(K)	المادة
85	6100	H_2
27	5400	OH
15	4300	HCl
2.8	3100	CO
2.5	2750	NO
2.1	2300	O_2
0.35	800	Cl_2

الذرة إلى $(\frac{7}{2}R)$ مما يوضح أن جميع درجات الحرية السبع تشارك بنصيب متساو فى الطاقة الحرارية . لاحظ أن معظم الغازات المدرجة في الجدول 3-12 لها طاقات دورانية عند درجة حرارة الغرفة ، ولكن ليس لها طاقات اهتزازية على الإطلاق . وعليه فإن العدد الكلى لدرجات الحرية فى هذه الغازات يساوى 5 ، ومن ثم فإن $\gamma = 1.4$.

وهكذا نرى أن السلوك المحير للحرارتين النوعيتين الذى ناقشناه فى بداية هذا الفصل قد أمكن تفسيره بنجاح بوجود كمات متناهية الصغر للطاقة الدورانية والاهتزازية . وبالرغم من أن طاقة الكم الواحد متناهية الصغر ، إلا أن تأثيراتها تنعكس بوضوح على السلوك الماكروسكوبى للمادة . وقد كان هذا نصرًا لميكانيكا « الكم » الجديدة فى البدايات المبكرة للقرن العشرين .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) حالة النظام ، (ب) متغير الحالة ، (جـ) دالة الحالة ، (د) الطاقة الداخلية ، (هـ) الرسم البيانى PV ، (و) الحرارة النوعية الجزيئية (أو المولارية) ، (ز) العمليات الأيسوبارية والأيسوكورية والأدياباتية والأيسوثرمية ، (ح) عملية تخفيف الضغط بالخنق .

2 ـ كتابة القانون الأول فى صورة معادلة رياضية وشرح معنى كل حد فيها ، بما فى ذلك مدلول الإشارات الجبرية .

3 ـ ذكر ما هى الكمية التى تظل ثابتة أثناء كل من العمليات الآتية : (أ) الأدياباتية ، (ب) الأيسوبارية ، (جـ) الأيسوكورية ، (د) الأيسوثرمية .

4 ـ حساب الشغل المبذول بواسطة نظام أثناء أى عملية اختيارية يتغير حجم الغاز نتيجة لها إذا أعطيت الرسم البيانى PV للعملية.

5 ـ حساب التغير فى الطاقة الداخلية لغاز مثالى إذا أعطيت الحالتين الابتدائية والنهائية للغاز .

6 ـ شرح السبب فى أن C_P أكبر دائمًا من C_V للغاز . حساب C_P و γ عندما تكون C_V معلومة . حساب C_V و C_P عندما تكون γ معلومة .

7 ـ تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية لحساب الانتقال الحرارى أثناء تغير الحالة بمعلومية W و ΔU .

8 ـ استخدم القانون الأول للدناميكا الحرارية فى شرح (أ) لماذا يسخن الغاز عند انضغاطه أدياباتيًا ، (ب) لماذا لا تتغير درجة حرارة الغاز أثناء التمدد الحر ، (جـ) لماذا يبرد السائل عادة عندما يمر بعملية تخفيف الضغط بالخنق .

9 ـ إيجاد عدد درجات الحرية النشطة فى غاز مثالى بمعلومية C_V أو C_P أو γ .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

متغيرات الحالة الديناميكية الحرارية

متغيرات الحالة الديناميكية الحرارية هى تلك الكميات التى تحدد الحالة الديناميكية الحرارية الماكروسكوبية للنظام . كل مجموعة من قيم هذه المتغيرات تناظر حالة معينة واحدة . متغيرات الحالة للغاز المثالى هى P و V و T .

دوال الحالة الديناميكية الحرارية

دالة الحالة الديناميكية الحرارية هى خاصية تعتمد على متغيرات الحالة فقط . دالة الحالة لها قيمة وحيدة لكل حالة ، وهى لا تعتمد على العملية التى يصل بها النظام إلى هذه الحالة .

الطاقة الداخلية (U)

الطاقة الداخلية لنظام هى مجموع جميع طاقات الحركة والوضع لذراته وجزيئاته . الطاقة الداخلية دالة حالة ديناميكية حرارية .

خلاصة :

1 ـ فى حالة الغازات المثالية أحادية الذرة ، $U = \frac{2}{3}nRT = \frac{3}{2}NkT$.

2 ـ حيث أن الطاقة الداخلية دالة حالة ، إذن يعتمد التغير فى U على الحالتين الابتدائية والنهائية للنظام فقط ، ولكنه لا يعتمد على عملية التغير .

القانون الأول للديناميكا الحرارية

القانون الأول للديناميكا الحرارية هو صيغة لمبدأ بقاء الطاقة يتضمن الانتقال الحرارى إلى النظام أو من النظام :

$$Q = \Delta U + W$$

خلاصة :

1 ـ تعنى إشارة Q الموجبة أن الحرارة مضافة إلى النظام ، إذا كان W موجبًا فذلك يعنى أن الشغل مبذول بواسطة النظام .

2 ـ الشغل الموجب يدل دائمًا على تمدد حجمى للنظام . أما الشغل السالب فيعنى انضغاط النظام ، ويكون الشغل فى هذه الحالة مبذولاً على النظام بواسطة قوة خارجية .

حالات خاصة لتغير الحالة الديناميكية الحرارية

تحدث بعض التغيرات فى الحالة الديناميكية الحرارية للنظام عند ثبوت كمية معينة ما . هـذه التغيرات تبسط القانون الأول بطرق مختلفة . وهذه أربعة من مثل هذه التغيرات :

1 ـ تغير أيسوبارى (عند ثبوت الضغط) .

2 ـ تغير أيسوكورى (عند ثبوت الحجم) .

3 ـ تغير أيسوثرمى (عند ثبوت درجة الحرارة) .

4 ـ تغير أدياباتى (لا يوجد أى انتقال حرارى بين النظام والوسط المحيط) .

الخواص المميزة لهذه التغيرات ملخصة فى الجدول 2-12 .

الرسم البيانى PV

الرسم البيانى PV هو منحنى يمثل تغير الضغط مع الحجم للنظام ، وهو يستخدم لتوضيح تغيرات حالة النظام عندما تكون التغيرات الحجمية كبيرة . كل نقطة فى هذا الرسم تمثل حالة ديناميكية حرارية واحدة . أى خط أو منحنى فى هذا الرسم يمثل عملية معينة لتغير الحالة .

خلاصة :

1 ـ فى حالة الغازات المثالية ، يمكن استخدام قانون الغاز المثالى لحساب درجة الحرارة عند أى نقطة فى الرسم البيانى PV .

2 ـ الخط الأفقى فى الرسم البيانى PV يمثل عملية أيسوبارية .

3 ـ الخط الرأسى يمثل عملية ثابتة الحجم (أيسوكورية) .

حساب ΔU نتيجة لتغيرات الحالة

يمكن حساب ΔU لأى تغير فى الحالة بمعلومية درجتى الحرارة الابتدائية والنهائية :

$$\Delta U = nC_V \Delta T$$

الحرارتان النوعيتان الجزيئتان (المولاريتان) للغازات المثالية

للعمليات ثابتة الحجم (C_V) :

$$C_V = \frac{3}{2}R$$ (للغاز أحادى الذرة)

$$C_V = \frac{K}{2}R$$ (للغاز الجزيئى)

K عدد صحيح تقريبًا ، وتعتمد قيمته على نوع الغاز ودرجة حرارته (انظر القيم الفعلية للحرارة النوعية C_V فى الجدول 1-12) .

للعمليات ثابتة الضغط (C_p) :

$$C_p = C_V + R$$ لجميع الغازات

خلاصة :

1 ـ النسبة بين الحرارتين النوعيتين γ هى كمية هامة :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

2 ـ فى العمليات الأدياباتية تتغير P مع V بحيث تكون PV^{γ} ثابتًا :

حساب الشغل فى العمليات الديناميكية الحرارية

يعتمد الشغل على نوع العملية ، يمكن حساب W جبريًا فى العمليات الأربع كالتالى :

1 ـ فى العملية الأيسوكورية : $W = 0$

2 ـ فى العملية الأيسوبارية : $W = P\Delta V$

3 ـ فى العملية الأيسوثرمية : $W = nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$

4 ـ فى العملية الأديابتية : $W = -(\Delta U)$

فى جميع العمليات الأخرى يمكن تعيين الشغل بيانيًا بإيجاد المساحة الواقعة تحت منحنى العمليــة فــى الرسم البيانى PV . ويستدل على إشارة W بملاحظة ما إذا كان الحجم يزداد أو يقل نتيجة للعملية .

حساب الانتقال الحرارى فى العمليات الديناميكية الحرارية

يمكن حساب كمية الحرارة المنتقلة بطريقة مباشرة بالنسبة للعمليات الأربع :

1 ـ فى العملية الأيسوكورية : $Q = nC_V\Delta T$

2 ـ فى العملية الأيسوبارية : $Q = nC_p\Delta T$

3 ـ فى العملية الأيسوثرمية : $Q = nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$

4 ـ فى العملية الأديابتية : $Q = 0$

فى العمليات الأخرى يمكن حساب Q من القانون الأول بعد إيجاد W و Q بالطرق السابق وضعها :

$$Q = \Delta U + W$$

تعريف عملية تخفيف الضغط بالخنق

عملية تخفيف الضغط بالخنق (وتعرف أيضًا بالتمدد الحر) هى عملية تمدد غاز تحت ضغط عال تمددًا أدياباتيًا خلال فتحة صغيرة إلى منطقة فراغ أو ضغط صغير جدًا بالنسبة إلى ضغط الغاز المتمدد .

خلاصة :

1 ـ حيث أن الغاز لا يبذل شغلاً خلال التمدد الحر ، وحيث أن $Q = 0$ لأن العملية أدياباتية ، فإن درجة حرارة الغاز المثالى لا تتغير .

2 ـ عندما يتمدد سائل فى الفراغ مع تغير طوره إلى الطور الغازى ، تستمد حرارة التبخير من الطاقة الداخلية للسائل ، وهذا يؤدى إلى انخفاض درجة حرارة المادة .

أسئلة وتخمينات

1 ـ يدعى مخترع أن لديه محرك يبدأ العمل بواسطة بطارية ، ولكنه يستمر فى العمل بعد ذلك بدون أى مصدر خارجى للقدرة ، ويقوم أثناء ذلك بإعادة شحن البطارية وبذل الشغل الخارجى . هذا يتعارض مع أحد قوانين الطبيعة ، ما هو هذا القانون ؟ وماذا يقول القانون الأول عن آلات الحركة الدائمة ؟

2 ـ العلاقة $\Delta U = Q - W$ لا تكافئ العلاقة $\Delta U = Q - P\Delta V$ دائمًا . إعط مثالاً لا تنطبق عليه العلاقة الثانية رغم انطباق العلاقة الأولى عليه .

3 ـ وضح معنى كل كمية فى المعادلة $\Delta U = Q - W$ فى كل من العمليات الآتية :
انصهار مكعب من الثلج ببطئ متحولاً إلى ماء عند $0°C$ ، تسخين الثلج من درجة $-30°C$ إلى $-10°C$ ، تبريد بخار الماء فى غلاية مغلقة من درجة $120°C$ إلى $110°C$ ، تسامى (التحول من الطور الصلب إلى الطور الغازى مباشرة بدون المرور على الطور السائل) CO_2 الصلب (الثلج الجاف) فى الهواء داخل إناء كبير ، تجمد زجاجة مياه غازية وشرخ الزجاجة .

4 ـ بالرغم من أن $C_P - C_V = R$ للغازات المثالية ، إلا أن الفرق بين الحرارتين النوعيتين لوحدة الكتلة $c_P - c_V$ تتغير من غاز إلى غاز . ما السبب فى هذا الاختلاف ؟

5 ـ كيف يمكن تعيين الكتلة الجزيئية لغاز بقياس c_P و c_V لهذا الغاز ؟

6 ـ يراد ضغط كمية من غاز فى إناء إلى نصف حجمها الأصلى . متى تكون كمية الشغل المبذول أكبر ، عندما يكون الانضغاط أيسوثرميًا أو أدياباتيًا ؟

7 ـ وضعت أسطوانتان يغلق كل منهما كباس قابل للحركة جنبًا إلى جنب ، وكانت الأسطوانتان متماثلتين من جميع الوجوه عدا أن إحداهما كانت تحتوى على غاز الأكسجين O_2 ، بينما تحتوى الأخرى على غاز الهليوم He . ضغطت الأسطوانتان أدياباتيًا إلى خمس حجمها الأصلى . أى الغازين ترتفع درجة حرارته أكثر من الآخر ؟

مسائل

القسم 2-12

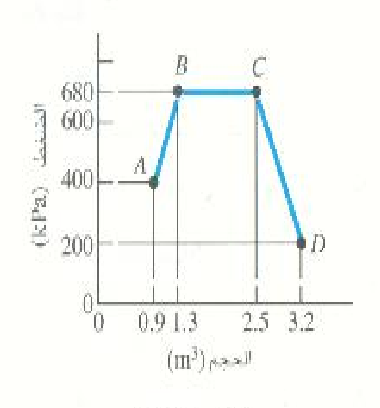
1 ـ ينصهر قالب من الثلج كتلته 2.2 kg إلى ماء عند درجة حرارة $0°C$. بأى قدر تتغير الطاقة الداخلية للثلج ؟ إهمل التغير الصغيرة فى الحجم .

2 ـ ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية لقطعة من النحاس عند تسخينها من $27°C$ إلى $115°C$ ؟ إهمل التغير الصغير فى الحجم .

3 ـ ما مقدار الانخفاض فى درجة حرارة قطعة من الألمنيوم كتلتها 65 g ، إذا كان التغير فى طاقتها الداخلية 350 J ؟ إهمل أى تغير فى الحجم .

4 ـ ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية لكمية من الرصاص المنصهر كتلتها 265 g عندما تتجمد عند نقطة انصهارها ؟ إهمل أى تغير فى الحجم .

القسم 12-3



شكل م12-1

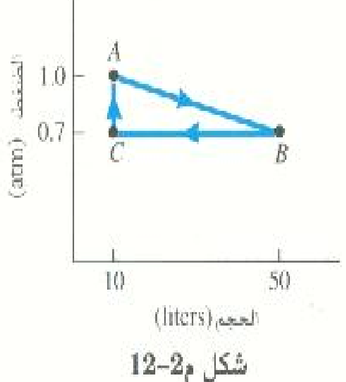
5 ـ يوضح الشكل م 12-1 الرسم البيانى PV لغاز محبوس فى أسطوانة ذات كباس . ما مقدار الشغل الذى يبذله الغاز عند تمدده من الحالة A إلى الحالة C باتباع المسار الموضح ؟

6 ـ ما مقدار الشغل الذى يبذله الغاز عند انضغاطه من الحالة D إلى الحالة A باتباع المسار الموضح بالرسم البيانى PV فى الشكل م 12-1 ؟

7 ـ ضغط غاز مثالى أيسوثرميًا إلى خمس حجمه الأصلى ، وكان مقدار الشغل المبذول لضغط الغاز إلى الحجم الجديد 167 J . (أ) ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية للغاز ؟ (ب) ما هى كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة الغاز ؟

8 ـ تمدد غاز مثالى إلى ثلاثة أمثال حجمه ، وكان الشغل المبذول بواسطة الغاز أثناء التمدد 350 J وكمية الحرارة المضافة 570 J . (أ) هل ترتفع درجة حرارة الغاز أم تنخفض أو تظل ثابتة عند انتهاء العملية ؟ (ب) ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية ؟

9 ـ سخنت كمية معينة من غاز الهليوم فى إناء مغلق صلب من $-95°C$ إلى $70°C$ ، وكانت كمية الحرارة المضافة أثناء عملية التسخين 130 J . ما هى كمية الهليوم (بالجرام والمول) داخل الإناء ؟



شكل م12-2

■ 10 ـ يمثل الشكل م 12-2 دورة ديناميكية حرارية تتغير فيها حالة غاز مثالى من A إلى B ، ثم من B إلى C ، وتعود أخيرًا إلى الحالة الأصلية A . احسب الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال الدورة بأكملها . **تلميح** : تأكد من صحة إشارات W فى كل خطوة بالدورة .

القسم 12-5

■ 11 ـ افترض أن كمية من غاز الأرجون قدرها 2.3 mol قد سخنت من $-45°C$ إلى $90°C$. أوجد التغير فى الطاقة الداخلية للغاز والشغل المبذول بواسطة الغاز عندما يحدث التسخين (أ) عند ثبوت الحجم ، (ب) عند ثبوت الضغط .

12 ـ ملأ إناء صلب حجمه 700 liters بغاز النيتروجين N_2 عند معدل الضغط ودرجة الحرارة . ما هى كمية الحرارة (بالجول) اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز إلى $27°C$ ؟ ما ضغط الغاز عند $27°C$ ؟

13 ـ النسبتان الكتليتان لغازى الأكسجين O_2 والنيتروجين N_2 فى الهواء هما بالتقريب 21% و 79% ، على الترتيب . استخدم هذه الحقيقة فى حساب c_V للهواء .

■ 14 ـ هل يمتص الغاز المثالى أحادى الذرة الحرارة أم يفقدها عند انضغاطه من 795 cm^3 إلى 260 cm^3 تحت ضغط ثابت قدره 155 kPa ؟ ما مقدار هذه الكمية من الحرارة ؟ اعتبر أن درجة الحرارة الابتدائية $230°C$.

15 ـ ملأ بالون بحجم قدره 4.5 m^3 من الهليوم عند الضغط ودرجة الحرارة العياريين . ما هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز إلى $37°C$ عندما يتمدد البالون عند الضغط الجوى ؟

القسمان 12-6 و 12-7

16 ـ ما مقدار الشغل اللازم لضغط غاز أيسوثرميًا من 125 liters إلى 60 liters إذا كان الغاز يفقد أثناء العملية كمية من الحرارة قدرها 35 cal ؟

17 ـ ما هي كمية الشغل اللازمة لضغط 3.3 mol من غاز O_2 عند درجة 25°C أيسوثرميًا من $90\ cm^3$ إلى $40\ cm^3$ ؟ ما مقدار كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة الغاز ؟

18 ـ كرر المسألة 17 عندما يحدث الانضغاط أدياباتيًا وليس أيسوثرميًا .

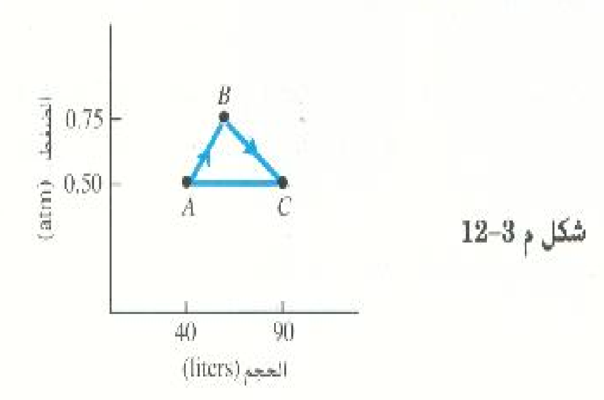
19 ـ إذا كانت γ لغاز مثالي تساوى 1.28 ، أوجد قيمتي C_P و C_V للغاز .

20 ـ إذا كانت $C_P = 5R/2$ لغاز مثالي ، أوجد قيمة γ للغاز .

▪ 21 ـ رفعت درجة حرارة 90 g من غاز N_2 من 10°C إلى 100°C عند ضغط ثابت قدره 1 atm . أوجد كلاً من ΔU و ΔW و Q لـهذه العملية .

▪ 22 ـ عد إلى المسألة 10 واحسب التغير في الطاقة الداخلية للغاز وكمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة في كل من العمليات AB و BC و CA . افترض أن كتلة الـهليوم 5 g .

▪▪ 23 ـ مر 2 mol من غاز مثالي ($\gamma = 1.40$) بالعملية الديناميكية الحرارة ABC الموضحة بالشكل م 3-12 . أوجد الشغل المبذول والتغير في الطاقة الداخلية وكمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة .



شكل م 3-12

▪ 24 ـ ضغط (2/3 mol) من غاز مثالي أدياباتيًا فارتفعت درجة حرارته بمقدار 45°C عندما كان الشغل المبذول بواسطة الضاغط على الغاز 370 J . (أ) ما مقدار التغير في الطاقة الداخلية للغاز أثناء الانضغاط ؟ (ب) إذا برد الغاز بعد ذلك إلى درجة حرارته الأصلية مع حفظ حجمه ثابتًا أثناء العملية ، فما هي كمية الحرارة التي يفقدها الغاز ؟ (جـ) ما قيمة كل من C_V و γ لـهذا الغاز ؟

▪ 25 ـ أسطوانة ذات كباس قابل للحركة تحتوي على 30 g من غاز الـهيدروجين H_2 . سخن الغاز من درجة 20°C إلى 270°C عند ضغط ثابت مقداره 4.4 atm . ما هي كمية الحرارة اللازمة لـهذه العملية ؟

▪ 26 ـ أسطوانة حجمها $16{,}000\ cm^3$ ذات كباس قابل للحركة تحتوي على 1.1 mol من غاز CO_2 عند درجة 30°C . ضغط الكباس فجأة بحيث انضغط الغاز أدياباتيًا إلى حجم قدره $1600\ cm^3$. أوجد درجة الحرارة النهائية للغاز والشغل المبذول عليه .

▪ 27 ـ تمددت كمية من غاز النيتروجين N_2 أدياباتيًا من الضغط الابتدائي 25 atm ودرجة الحرارة الابتدائية 27°C فأصبحت درجة حرارته النهائية −25°C . كم مرة زاد حجم هذا الغاز ؟

▪ 28 ـ كمية من غاز الأكسجين O_2 حجمها 2 liters عند ضغط قدره 10 atm ودرجة حرارة قدرها 27°C . أوجد الضغط النهائي إذا سمح للغاز بالتمدد إلى حجم جديد قدره 10 liters (أ) أيسوثرميًا ، (ب) أدياباتيًا .

▪ 29 ـ ضغط كمية من غاز الـهليوم عند درجة 27°C وضغط 1.6 atm أدياباتيًا إلى ربع حجمها الأصلي . أوجد الضغط ودرجة الحرارة النهائيين للغاز .

مسائل عامة

■■ 30 ـ عينة من الهواء ($\gamma = 1.40$) حجمها الأصلي $V_1 = 20$ L ودرجة حرارتها الأصلية $T_1 = 290$ K . ضغطت هذه العينة ببطء من ضغط قدره 1 atm إلى 2.0 atm بحيث ظلت درجة الحرارة ثابتة أثناء هذا الانضغاط . بعدئذ تمدد الهواء فجأة (أدياباتيًا) إلى ضغطه الأصلي 1 atm . (أ) ارسم الرسم البياني PV لهذه العمليات . (ب) أوجد الحجم ودرجة الحرارة النهائيين . (جـ) أوجد ΔU و Q و W لكل عملية .

■ 31 ـ غليت كمية من الماء السائل كتلتها 1 kg عند ضغط قدره 1 atm ودرجة حرارة قدرها 100°C فتحولت إلى بخار حجمه 1.67 m^3 . (أ) ما هي كمية الحرارة التي تحولت إلى شغل تمددي نتيجة للغليان ؟ (ب) ما هي كمية الحرارة التي تحولت إلى طاقة داخلية ؟

■ 32 ـ افترض أن لديك 36 g من الماء عند درجة حرارة ابتدائية قدرها 20°C وضغط ابتدائي قدره 1 atm . ما هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء إلى نقطة الغليان ثم غلي الماء ثم رفع درجة حرارة بخار الماء إلى 150°C مع بقاء الضغط ثابتًا عند 1 atm . **تلميح** : بخار الماء غاز جزيئي ثلاثي الذرات له ثلاث درجات حرية دورانية نشطة في هذا المدى من درجات الحرارة بالإضافة إلى درجات الحرية الانتقالية العادية .

33 ـ ما قيمة ذلك الجزء من كمية الحرارة المضافة الذي يتحول إلى طاقة داخلية ، والجزء الذي يتحول إلى شغل تمددي أثناء تمدد ثابت الضغط لغاز مثالي إذا علمت أن $\gamma = 1.28$ لهذا الغاز .

34 ـ يمر 30 kg من CO_2 بعملية انضغاط أيسوثرمي عند $T = 500$ K وتتغير كثافته نتيجة لذلك من 30.75 kg/m^3 إلى 30.0 kg/m^3 . (أ) ما مقدار الضغط الابتدائي للغاز ؟ (ب) احسب الشغل المبذول على الغاز والتغير في طاقته الداخلية وكمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة أثناء العملية .

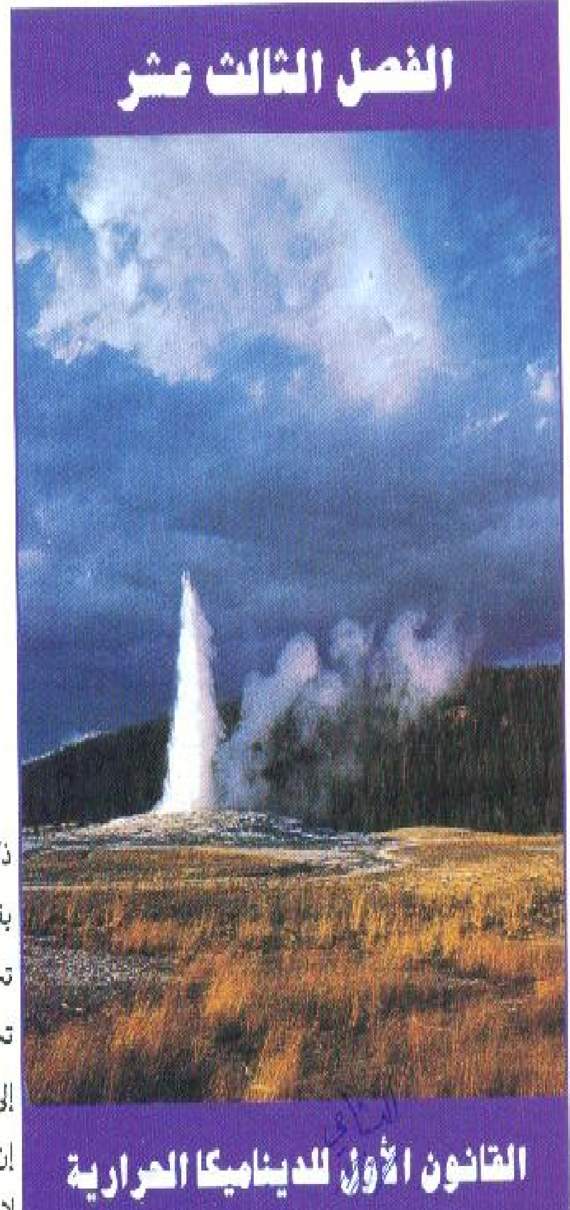
■ 35 ـ سخنت كتلة من الألومنيوم مقدارها 1 kg من درجة 25°C إلى 600°C . ما قيمة الشغل الذي يبذله الألومنيوم أثناء التمدد ضد الضغط المحيط ومقداره 1 atm ؟ احسب نسبة هذا الشغل إلى كمية الحرارة المضافة W/Q ، وعين إلى أي حد من الضباطة يعتبر التقريب $W = Q$ صحيحًا .

■■ 36 ـ حبست كمية من غاز الأرجون داخل أسطوانة رأسية قطرها 8.0 cm بواسطة كباس كتلته 15.0 kg يمكنه أن يتحرك بحرية في الاتجاه الرأسي . وضعت الأسطوانة داخل غرفة تفريغ بعد عزلها عزلاً حراريًا جيدًا عن الوسط المحيط . وعندما كانت درجة حرارة الأرجون داخل الأسطوانة 35°C وضغط الهواء في الغرفة الخارجية 760 torr ، استقر الكباس في موضع اتزان يرتفع عن قاعدة الأسطوانة بمقدار 22.5 cm . (أ) ما عدد المولات من الأرجون داخل الأسطوانة ؟ ، (ب) فرغت الآن غرفة التفريغ من الهواء (أي أصبح الضغط داخلها أقل من 0.001 torr) . أين يقع موضع الاتزان الجديد للكباس وما هي درجة الحرارة الجديدة للأرجون ؟

■■ 37 ـ لديك غاز مثالي ثنائي الذرة حرارته النوعية الكتلية $c_V = 920$ J/kg.K . أوجد القيم التقريبية (أ) للكتلة الجزيئية M ، (ب) لكل من الحرارتين النوعيتين C_V . C_P ، (جـ) للنسبة γ .

■■ 38 ـ ضغط الهواء عند قاعدة جبل 1.0 atm ودرجة حرارته 300 K . (أ) إذا كان الهواء يرتفع أدياباتيًا إلى قمة الجبل ، حيث $P = 0.94$ atm ، فماذا ستكون درجة حرارته ؟ (افترض أن الهواء يتكون من غاز النيتروجين N_2 والأكسجين O_2 فقط) . (ب) هل ترتفع درجة حرارة الهواء أو تنخفض عندما يتكثف بعض بخار الماء منه ؟

الفصل الثالث عشر



القانون الأول للديناميكا الحرارية

ذكرنا آنفًا أن القانون الأول للديناميكا الحرارية هو صيغة لمبدأ بقاء الطاقة ، وأن أى عملية قد تخرق هذا القانون لا يمكن تحدث تلقائيًا . فالحجر الساكن على الأرض مثلاً لا يستطيع تحويل الطاقة الحرارية الموجودة فيه أو فى الوسط المحيط به إلى طاقة حركة تمكنه من الانطلاق تلقائيًا إلى أعلى فى الهواء . إن القانون الأول لا يستبعد هذه الإمكانية ، ومع ذلك فإنها لا تحدث أبدًا . وإذا وضعت بعض قطع من الثلج فى إناء يحتوى على ماء ساخن سوف نجد أن الخليط يصل بعد فترة زمنية ما إلى درجة حرارة اتزان معينة بين درجتى الماء الساخن والثلج البارد ، ولا يحدث مطلقًا أن يصبح الثلج أكثر برودة وأن يصبح الماء أكثر حرارة ، هذا بالرغم من أن الطاقة تظل محفوظة فى الحالتين . هذا يدل على أن للطبيعة اتجاه مفضل لحدوث الأحداث التلقائية ، كما لو أن الطبيعة قد أصدرت حكمها الأبدى بألا يكون الزمن انعكاسيًا . فالزمن كالسهم الذى يشير فى اتجاه واحد فقط ، ومن ثم يجب أن تتبع كل العمليات الطبيعية التلقائية ذلك المسار الذى اختارته الطبيعة لها .

وسوف نرى هنا أن القانون الثانى للديناميكا الحرارية هو المبدأ الضرورى لتفسير اتجاه سهم الزمن . وهذا القانون يخبرنا أن النظام فى الكون يتجه بقسوة وعناد تجاه اللانظام (أو الفوضى) ، وهذا ما سوف يتضح لنا عند تناول موضوع النظام واللانظام .

13-1 النظام واللانظام (الفوضى)

يعلم كل مقامر أن احتمال حدوث حدث معين يزداد كلما أمكن أن يتحقق ذلك الحدث بطرق كثيرة مختلفة . ولتوضيح هذه الحقيقة ، لنأخذ لعبة إلقاء خمس قطع عملة معدنية

متماثلة على منضدة بعد هزها فى كوب مثلاً هزًا جيدًا . هناك ستة أحداث ممكنة فقط يمكن أن تحدث فى كل رمية (جدول 1-13) .

قد يبدو للوهلة الأولى أن احتمال حدوث كل من الأحداث المدرجة بالجدول 1-13 متساوى ، ولكن هذا ليس صحيحًا . ذلك أن هناك طريقة واحدة فقط لحدوث الحدث 1 أو الحدث 6 ، ولكن هناك خمس طرق مختلفة لحدوث الحدث 2 . وإذا رمزنا لقطع العملة الخمس بالحرف A, B, C, D, E سنجد أن هذه الطرق كما هو موضح بالجدول 2-13 . وحيث أن عدد الطرق التى يمكن أن يتحقق بها الحدث 2 أكبر خمس مرات من عدد الطرق التى يتحقق بها الحدث 1 ، فإن احتمال حدوث الحدث 2 أكبر خمس مرات من احتمال حدوث الحدث 1 . وحيث أن الحدث 5 يمكن أن يتحقق بخمس طرق مختلفة أيضًا ، إذن ، احتمال حدوث كل من الحدثين 2 و 5 متساوى . ومن الواضح أن احتمال حدوث كل من الحدثين الأخيرين أكبر خمس مرات من احتمال حدوث كل من الحدثين 1 و 6 .



لكل من الكرات المرقمة العشرة فى آلة اللوتارية نفس احتمالية الاختيار . هل يمكنك حساب العدد الكلى للحالات الميكروئية ؟

لنتوقف لحظة لتلخيص هذه الملاحظات بصورة عامة . عند تعريف كل حدث فى الجدول 1-13 اعتبرنا أن قطع العملة الخمس كلها متكافئة ، بمعنى أنه لا فرق بين أن تظهر الصورة أو الكتابة على الوجه العلوى لهذه القطعة أو تلك . ويسمى كل حدث عندئذ **بالحالة الماكروئية (الكلية)** للترتيبات المكنة لقطع العملة . ويوضح الجدول 2-12 الطرق المختلفة التى تكون بها قطع العملة المنفردة حالة ماكروئية واحدة هى بالتحديد الحدث 2 فى الجدول 1-13 ، وسوف نسمى كلاً من الترتيبات المختلفة بالجدول 2-13 (التى تناظر نفس الحدث ، 2) **بالحالة الميكروئية (المجهرية)** . هذا ويمثل الجدول 2-13 عدد الحالات الميكروئية لكل حدث بالجدول 1-13 .

يمكن تعريف احتمالية حدوث حالة ماكروئية معينة على أساس الفرض البسيط التالى :

كل حالة **ميكروئية** لها نفس احتمالية الحدوث ، أى أن احتماليات حدوث جميع الحالات الميكروئية المناظرة لحالة ماكروئية معينة متساوية .

جدول 1-13 :

يوجد ست نتائج (أحداث) ممكنة فى لعبة إلقاء قطع العملة المعدنية الخمس .

الحدث	صورة	كتابة
1	0	5
2	1	4
3	2	3
4	3	2
5	4	1
6	5	0

جدول 2-13 :

الطرق المختلفة لحدوث الحدث 2.

عدد الطرق	A	B	C	D	E
1	ص	ك	ك	ك	ك
2	ك	ص	ك	ك	ك
3	ك	ك	ص	ك	ك
4	ك	ك	ك	ص	ك
5	ك	ك	ك	ك	ص

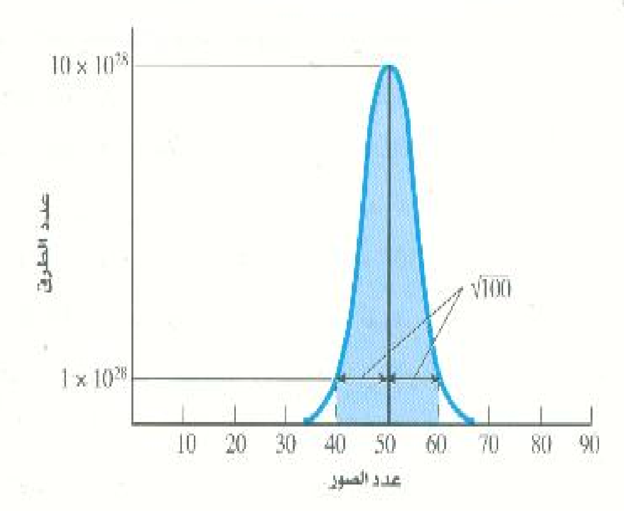
ص ـ صورة .
ك ـ كتابة .

جدول 3-13 :

جدول الاحتمالية لقطع العملة الخمس .

الحدث الحالة الماكروئية	عدد الطرق (الحالات الميكروئية)	احتمالية الحالة الماكروئية
1	1	$\frac{1}{32} = 0.03$
2	5	$\frac{5}{32} = 0.16$
3	10	$\frac{10}{32} = 0.31$
4	10	$\frac{10}{32} = 0.31$
5	5	$\frac{5}{32} = 0.16$
6	1	$\frac{1}{32} = 0.03$

وهكذا ، تعرف احتمالية حدوث حدث معين (حالة ماكروئية معينة) ببساطة بأنها نسبة عدد الحالات الميكروئية التي يمكن أن تكون لذلك الحدث إلى العدد الكلي للحالات الميكروئية التي يمكن حدوثها . فمثلاً ، العدد الكلي للحالات الميكروئية المتاحة لخمس قطع من العملة هو $32 = 2^5$ ، وعليه فإن احتمالية حدوث الحدث 2 تساوي % 15.6 = 5/32 . ويوضح الجدول 13-3 احتمالية كل من الأحداث الستة بالجدول 13-1 .



شكل 13-1:
عدد الطرق التى يظهر فيها العدد المبين من الصور على الوجه العلوى عند إلقاء 100 قطعة معدنية . عدد الطرق التى يظهر فيها على الوجه العلوى أقل من 30 صورة (أو أكثر من 70 كتابة) صغير جدًا بحيث لا يمكن تمثيله فى هذا الرسم البيانى ، ويمكن اعتباره صفرًا بالتقريب . لاحظ أن 90% تقريبًا من العدد الكلى للطرق يقع بين 40 و 60 صورة .

يمكننا تعميم هذا بالأسلوب المنطقى للدراسة على الحالات التى تتضمن عدد أكبر من قطع العملة ، وليكن 100 على سبيل المثال . فى هذه الحالة يكون العدد الكلى للحالات الميكروئية المتاحة $2^{100} = 1.3 \times 10^{30}$! ويلاحظ أن **واحدة** فقط من هذه الحالات الميكروئية تناظر الحالة الماكروئية التى تظهر فيها الصورة على جميع الأوجه العلوية لقطع العملة المائة ، وواحدة فقط تناظر ظهور الكتابة على الأوجه العلوية جميعًا . ومن جهة أخرى فهناك تقريبًا 10×10^{28} حالة ميكروئية لتكوين الحالة الماكروئية لظهور 50 صورة و 50 كتابة على الأوجه العلوية لقطع العملة (الشكل 13-1) . ومع ذلك فإن **الحالة الميكروئية لظهور 100 صورة على الوجه العلوى لها نفس الاحتمالية كغيرها من باقى الحالات الماكروئية الأخرى** ، ولكن احتمالية **الحالة الماكروئية** « 100 صورة » أقل بنسبة قدرها 10^{-29} من الحالة الماكروئية « 50 صورة و 50 كتابة » . هذ ويلخص الشكل 13-1 جميع الاحتماليات الممكنة فى حالة 100 قطعة عملة .

من الممكن تلخيص جميع هذه النتائج بطريقة بسيطة جدًا . لاحظ فى الشكل 13-1 أن الخط البيانى يقل إلى حوالى عشر قيمته العظمى عند النقطتين 40 صورة و 60 صورة . ولتقدير اتساع ذروة المنحنى يمكننا القول أنها تمتد من 10-50 إلى 10+50 ، بمعنى أنك إذا لقيت 100 قطعة عملة فإن عدد الصور التى يجب ظهورها على الوجه العلوى يساوى حوالى 10 ± 50 . النتيجة العامة إذن هى :

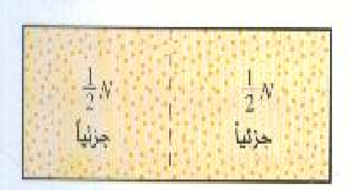
ويسمى العدد التالى للإشارة ± الانحراف المتوقع ، وهو يدلنا على المدى الذى يقع فيه

عدد الصور . ويبين التحليل الإحصائى التفصيلى أن 4 فى المائة فقط من عدد إلقاءات قطع العملة المائة سوف يعطى عددًا من الصور خارج هذا المدى .

وعند زيادة عدد قطع العملة إلى مليون (10^6) قطعة ، سيكون من المتوقع ظهور عدد قدره $500,000 \pm 1000$ من الصور على الوجه العلوى . لاحظ مدى دقة هذه النتيجة ، فهى تدل على أن عدد الصور يقع بين 501,000 و 499,000 ، وهو مدى ضيق جدًا فى الواقع . وبزيادة عدد قطع العملة إلى قيمة كبيرة جدًا ، سنجد أن الانحراف المئوى عن القيمة المتوسطة ضئيل جدًا .

هذا المثال عن قطع العملة هو مثال نموذجى لما يحدث فى الكون عمومًا . فإذا تركت الأحداث لتتم بنفسها تلقائيًا دون أى تدخل خارجى ، فإنها سوف تحدث طبقًا لقوانين الاحتمال الإحصائية . فمثلاً ، لنفرض أن لدينا صندوقًا يحتوى على عدد قدره 10^{20} من جزيئات غاز ما ، كما هو موضح بالشكل 2-13 ، والسؤال الآن هو : ما هى الفرص لأن نجد كل هذه الجزيئات متكدسة جميعًا فى أحد نصفى الصندوق ؟ من الممكن الإجابة عن هذا السؤال باستخدام النتائج التى توصلنا إليها فى مثالنا عن قطع العملة . ففى هذا الموقف يمثل كل من نصفى الصندوق إمكانيتين متساويتين لأى جزئ من جزيئات الغاز ، وهذا يشبه تمامًا إمكانيتى الصورة والكتابة فى حالة قطع العملة . وهكذا تخبرنا نتيجتنا السابقة أن عدد الجزيئات على أحد جانبى الصندوق يكون :

$$\frac{1}{2}(10^{20}) \pm \sqrt{10^{20}} = 5 \times 10^{19} = (5,000,000,000 \pm 1) \times 10^{10}$$



شكل 2-13:
ما هو احتمال تواجد جميع الجزيئات فى أحد نصفى الصندوق ؟

لاحظ أن الانحراف المتوقع صغير جدًا ، فهو يبلغ جزءًا واحدًا فقط من 5 بليون جزء . ولهذا يمكننا لجميع الأغراض العملية ، اعتبار أن عدد الجزيئات فى أحد نصفى الصندوق يساوى عددها فى النصف الآخر . وبالطبع ، لن توجد تقريبًا أى فرصة على الإطلاق أن تتكدس جميع الجزيئات تلقائيًا فى أحد نصفى الصندوق ، لأن هذه الحالة الماكروئية تمثلها حالة ميكروئية واحدة (من بين $2^{10^{20}}$ حالة) .

ويستنتج من ذلك أن هذه الاعتبارات ذات أهمية جوهرية فى جميع العمليات التلقائية . ويمكننا على أساسها أن نتنبأ بأن الحركة الحرارية (وغيرها من الاضطرابات العشوائية الأخرى) تتسبب فى تغيير حالة النظام الديناميكى الحرارى من النظام إلى الفوضى . وكمثال فج لذلك ، لنعد إلى حالة القطع المعدنية المائة السابقة . لنفرض أننا رتبنا هذه القطع جميعًا بعناية بحيث تكون الصور على الوجه العلوى ، وهذه حالة على درجة عالية من النظام . لنحركها الآن حركة شبيهة بالحركة الحرارية العشوائية بأن نقوم برجها رجًا شديدًا . عندئذ سوف **يختل النظام بسرعة ولن تعود قطع العملة أبدًا إلى حالة النظام الأصلية ذات الاحتمالية الضئيلة .**

وبالمثل ، يمكننا وضع جزيئات الغاز فى الشكل 2-13 فى حالة عالية النظام بوضعها جميعًا فى أحد نصفى الصندوق . والآن ماذا يحدث إذا سمح للجزيئات بأن تعيد ترتيب نفسها تلقائيًا عن طريق الحركة الحرارية العشوائية ؟ عندئذ سوف يختل النظام

ويتحول إلى فوضى بحيث تملأ الصندوق كله ، ولن تعود تلقائيًا إلى حالة النظام الابتدائية أبدًا .

يتضح لنا مما سبق أن مفهومى النظام واللانظام (الفوضى) مفهومان أساسيان فى هذه المناقشة . وقد رأينا أن أعلى حالات النظام يمكن أن تحدث فى حالة ميكروئية واحدة فقط ، حيث ترتب كل قطعة عملة أو كل جزئ بطريقة مضبوطة واحدة . وعلى العكس ، هناك طرق كثيرة لتحقيق حالات اللانظام ، وهذه هى **أكثر الحالات احتمالاً** . ولذلك فإن التغيرات التلقائية فى النظام الديناميكى الحرارى تتسبب فى انتقاله تجاه الحالات الأقل نظامًا ، أو الأكثر فوضى ، لأن هذه الحالات ذات احتمالية أكبر . وتلخيصًا لذلك نقول :

إذا سمح لنظام ديناميكى حرارى معزول مكون من أجزاء كثيرة بتغيير حالته تلقائيًا ، فإن هذه التغيرات تتم بحيث تؤدى إلى زيادة اللانظام (الفوضى) ، أو عدم نقصه فى أحسن الأحوال .

هذا القانون من قوانين الطبيعة ، الذى ينطبق على الأعداد الهائلة من الجزيئات ، هو أحد صور **القانون الثانى للديناميكا الحرارية** . وهو يفسر ميل الأنظمة الديناميكية الحرارية إلى الوصول إلى الاتزان الديناميكى الحرارى ، هذا بالرغم من أن القانون الأول لا يتطلب حدوث مثل هذه التغيرات . ذلك أن حالة الاتزان ؛ التى لا يميل النظام الديناميكى الحرارى إلى تغييرها تلقائيًا ، هى الحالة ذات الاحتمالية العظمى ، وبالتالى حالة أعلى درجة من اللانظام .

13-2 الأنتروبيا

يمكن تناول مضمون كل من النظام واللانظام (الفوضى) بطريقتين مختلفتين تمامًا ؛ ومع ذلك فإن كلتا هاتين الطريقتين تستخدمان الكمية المعروفة **بالأنتروبيا** . والأنتروبيا مفهوم ديناميكى حرارى أدخله ر . كلوزيوس فى منتصف القرن التاسع عشر ليتمكن من وصف النتائج المترتبة على الحقيقة المعروفة بأن الحرارة تنساب دائمًا من الجسم الساخن إلى البارد . ونظرًا لتضارب الآراء حول التركيب الذرى للمادة فى ذلك الوقت ، فقد قام كلوزيوس بوصف الأنظمة الديناميكية الحرارية بدلالة متغيرات الحالة الماكروسكوبية للنظام P, V, T, U .

لنفرض أن كمية من الحرارة Q قد أضيفت إلى نظام ما بطريقة انعكاسية عند ثبوت درجة حرارته عند القيمة T . فى هذه الحالة يعرف التغير الناتج فى أنتروبيا النظام ΔS بالعلاقة :

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad (1-13)$$

ويتضح من هذا التعريف أن النظام **يكتسب الأنتروبيا** (أى أن ΔS يكون موجبًا) عندما

تنساب الحرارة إلى النظام . ويتبين من المعادلة (1–13) أيضًا أن وحدات الأنتروبيا هى J/K ، ولكنها تقاس أحيانًا بالوحدات الحرارية مثل kcal/K أو cal/K .

لاحظ أن ΔS معرف للعمليات الأيسوثرمية فقط . ومع ذلك فقد تمكن كلوزيوس من إثبات أن الانتروبيا دالة حالة للنظام ، كالطاقة الداخلية U . ومن ثم ، إذا وجد نظامان ديناميكيان حراريان فى نفس الحالة الماكروسكوبية (أى إذا تساوت متغيرات الحالة P, V, T للنظامين) ، سيكون للنظامين نفس الأنتروبيا . علاوة على ذلك فإن كون الانتروبيا دالة حالة يعنى أن التغير فى الأنتروبيا ΔS لا يعتمد على العملية التى تتغير بها حالة النظام . وقد يبدو للوهلة الأولى أن هذا يتناقض مع المعادلة (1–13) لأن Q تعتمد على نوع العملية الديناميكية الحرارية المستخدمة فى تغيير حالة النظام ، ولكن هذا التناقض الظاهرى يمكن حله بطرق عديدة منها ما يلى :

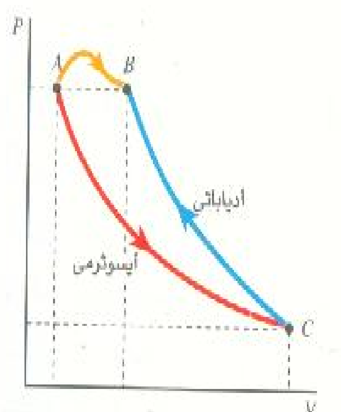
1 ـ إن أى تغير من الحالة A إلى الحالة B يمكن تحقيقه بعملية أيسوثرمية إلى حالة وسيطة C تتبعها عملية أدياباتية من C إلى B .

2 ـ طبقًا للتعريف ، Q تساوى صفرًا فى حالة التغير الأدياباتى ، وعليه فإن $\Delta S_{CB} = 0$.

3 ـ وبالنسبة للعملية الأيسوثرمية AC نجد من المعادلة (1–13) أن $\Delta S_{AC} = Q/T$.

4 ـ إذن ، $\Delta S_{AB} = \Delta S_{AC} + \Delta S_{CB} = \Delta S_{AC}$ مهما كان مسار العملية من A إلى B .

والواقع أن النقطة 4 هى الخاصية المميزة لتعريف دالة الحالة . ومن الطبيعى أن حساب ΔS_{AC} يتطلب تعيين الحالة الوسيطة C ، وهذا ما يمكن تحقيقه دائمًا .



شكل 3–13: حيث أن الأنتروبيا دالة حالة ، فإن التغير فى أنتروبيا النظام عندما تتغير حالته على طول المسار AB يساوى مجموع تغيرى الأنتروبيا على طول المسارين AC و CB .

مثال 1-13 :

ما مقدار التغير فى أنتروبيا النظام عند انصهار مكعب من الثلج كتلته 20.0 g عند درجة 0.00°C .

استدلال منطقى :

سؤال : ما نوع هذه العملية ؟

الإجابة : ينصهر الثلج عند درجة حرارة ثابتة (القسم 6–11) ، وعليه فإن العملية أيسوثرمية .

سؤال : بماذا يتعين التغير الأيسوثرمى فى الأنتروبيا ؟

الإجابة : كمية الحرارة المنتقلة ودرجة الحرارة التى تحدث عندها العملية : $\Delta S = Q/T$.

سؤال : كيف يمكن إيجاد كمية الحرارة المنتقلة ؟

الإجابة : تعتمد كمية الحرارة المنتقلة على كتلة الثلج وحرارة انصهار الماء (جدول 11–2) : $Q = mH$.

الحل والمناقشة : بوضع $T = 273\ K$ نجد أن :

$$\Delta S = \frac{mH_f}{T} = \frac{(20.0\ g)(80.0\ cal/g)}{273\ K} = 5.86\ cal/K = 24.5\ J/K$$

هذه الزيادة فى الأنتروبيا مقياس للفوضى فى ترتيب جزيئات الماء بعد أن تفقد بنيتها الصلبة المنظمة .

تمرين : إذا كان التغير فى درجة الحرارة صغيراً يمكن استخدام درجة الحرارة المتوسطة فى العلاقة الأيسوثرمية لحساب تغير الأنتروبيا . ما مقدار التغير فى الأنتروبيا إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للثلج $-10°C$ ؟ **الإجابة :** $24.7\ J/K$.

يرجع الفضل إلى الفيزيائى النمساوى لودفيج بولتزمان فى استنباط العلاقة بين الأنتروبيا ودرجة الفوضى فى النظام الديناميكى الحرارى . وقد أوضحنا فى مناقشتنا السابقة أن كل حالة ماكروئية للنظام يمكن أن تتحقق بعدد محدد من الحالات الميكروئية لترتيب جزيئات النظام . لنرمز إلى عدد الحالات الميكروئية المناظرة لحالة ماكروئية معينة بالحرف اليونانى أوميجا Ω . وبالطبع ، كلما زادت قيمة Ω ، كلما زادت احتمالية حدوث تلك الحالة الماكروئية . وعليه فإن حالة الاتزان (حالة أعلى احتمالية) هى الحالة المناظرة للقيمة العظمى لعدد الحالات الميكروئية Ω . وباستخدام هذه المفاهيم أثبت بولتزمان أن العلاقة بين الأنتروبيا S و Ω كالتالى :

$$S = k \ln \Omega \qquad (13\text{-}2)$$

حيث k ثابت بولتزمان الموجود فى نظرية الحركة للغازات . فإذا كانت حالة ماكروئية معينة تتحقق نتيجة لحالة ميكروئية واحدة فقط ، فإن $\Omega = 1$. وحيث أن $\ln\ 1 = 0$ ، فإن المعادلة (13-2) تخبرنا أن أنتروبيا النظام فى مثل هذه الحالة غير المحتملة (الحالة عالية النظام) تساوى صفراً . وبالمثل ، كلما زادت احتمالية الحالة الماكروئية (وبالتالى زادت درجة الفوضى) ، كلما زاد $\ln \Omega$ و S أيضاً . وبهذا أثبت بولتزمان أن **الأنتروبيا مقياس لدرجة الفوضى** فى الحالة الماكروئية للنظام . وبناء على ذلك يمكننا كتابة القانون الثانى للديناميكا الحرارية فى الصيغة التالية :

عندما تتغير حالة النظام المعزول فى عملية ديناميكية حرارية ، فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الأنتروبيا ، أو تظل ثابتة فى أحسن الأحوال .

مثال 13-2 :

افترض أن لديك صندوقاً يحتوى على 100 جزئ ، واعتبر حالتين ماكروئيتين لتوزيع الجزيئات فى الصندوق . فى الحالة A يحتوى أحد نصفى الصندوق على 60 جزيئاً ويحتوى النصف الآخر على 40 جزيئاً . أما فى الحالة B فإن الجزيئات تكون مقسمة بالتساوى على نصفى الصندوق . استخدم الشكل 13-1 لحساب تغير الأنتروبيا عند انتقال الصندوق من الحالة A إلى الحالة B .

استدلال منطقي :

سؤال : على ماذا تعتمد أنتروبيا الحالتين ؟

الإجابة : تعتمد الأنتروبيا على احتمالية الحالتين ، ومن المعلوم أن الاحتمالية تقاس بعدد الحالات الميكروئية التي تكون الحالة الماكروئية .

سؤال : كيف يمكن استخراج هذه المعلومات من الشكل 1–13 ؟

الإجابة : ذكرنا سابقًا أن التوزيع الجزيئي في نصفي الصندوق هو نفس التوزيع كما في مسألة سقوط قطع العملة المائة بالصورة أو الكتابة على أسطحها العلوية ويوضح الشكل 1–13 أن عدد الحالات الميكروئية يساوي 10^{29} في الحالة B وحوالي عشر هذه القيمة في الحالة A .

سؤال : ما هي العلاقة التي تعطي أنتروبيا النظام في أي حالة ديناميكية حرارية ؟

الإجابة : تعريف بولتزمان للأنتروبيا $S = k \ln \Omega$. وعليه فإن الفرق بين أنتروبيا النظام في الحالتين :

$$\Delta S = S_B - S_A = k (\ln \Omega_B - \ln \Omega_A)$$

الحل والمناقشة : بحساب الأنتروبيا في الحالتين نجد أن :

$$S_A = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \ln(1 \times 10^{28}) = 8.90 \times 10^{-22} \text{ J/K}$$

$$S_B = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \ln(1 \times 10^{29}) = 9.21 \times 10^{-22} \text{ J/K}$$

إذن :

$$\Delta S = (9.21 - 8.90) \times 10^{-22} \text{ J/K} = 0.31 \times 10^{-22} \text{ J/K}$$

لاحظ أن هذه زيادة في الأنتروبيا ، وهذا يعني أن حالة التوزيع المتساوي للجزيئات بين نصفي الصندوق (الحالة B) هي حالة على درجة أعلى من الفوضى ، وبالتالي حالة ذات احتمالية أعلى .

ملحوظة : يمكن حل هذه المسألة بطريقة مختصرة بملاحظة أن الفرق بين لوغاريتمي عددين يساوي لوغاريتم النسبة بينهما :

$$\Delta S = k (\ln \Omega_B - \ln \Omega_A) = k \ln \frac{\Omega_B}{\Omega_A}$$

$$= (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \ln 10 = 0.32 \times 10^{-22} \, J/K$$

13-3 المحركات الحرارية : تحول الطاقة الحرارية إلى شغل

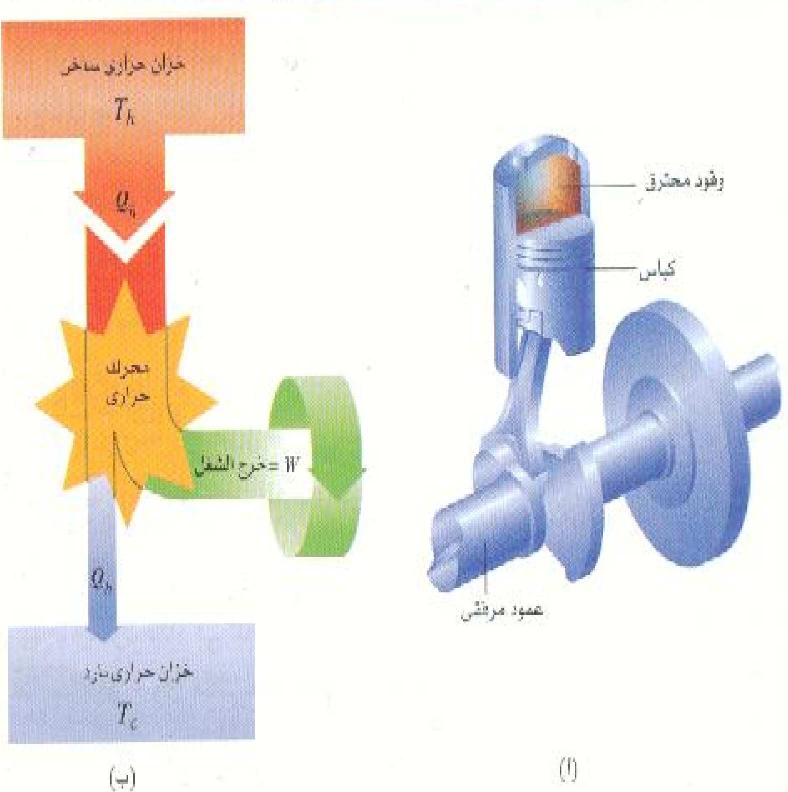
بدأ تطور علم الديناميكا الحرارية في عصر الثورة الصناعية قرب نهاية القرن الثامن عشر ، وذلك هو الوقت الذي شهد اختراع المحركات البخارية التي أدت إلى تغيير هائل في حضارتنا الإنسانية . ونظرًا لأن المحركات البخارية الأولى كانت آلات ذات كفاءة منخفضة للغاية ، فقد دعى علماء ذلك العصر إلى فحص القوانين الفيزيائية التي تحكم

هـذه المحركات ، وكانت هذه الدعوة بمثابة القوة الدافعة للأعمال المبكرة فى مجال الديناميكا الحرارية ، كما كان لنتائج هذه الأبحاث أثرًا كبيرًا فى تقدم جميع فروع العلم ابتداء من العلوم الفيزيائية وانتهاء بالعلوم البيولوجية .

المحرك البخارى مثال لما يعرف **بالمحركات الحرارية** . والمحرك الحرارى **هـو أى جهاز يقوم بتحويل جزء من الطاقة الحرارية إلى شغـل ميكـانيكى** . ومن الواضـح أن المحرك البخارى يتفق مع هذا الوصف ، وهذا ينطبق أيضًا على المحرك البنزينى الـذى يستخدم الطاقة الحرارية المنطلقة نتيجة لاحتراق الوقود . كذلك فـإن المحركـات الأكـثر غرابة والتى تستخدم حرارة الشمس أو المفاعلات النووية هى أيضًا محركـات حراريـة . لنتعرف الآن على القوانين الفيزيائية التى تخضع لـها كل هذه المحركات .



المحركـات النفاثـة المسـتخدمة فـى الطائرات تحول الطاقة الحراريـة إلـى شغل ، ولكن العادم المشـاهد بوضـوح يبيـن أن جـزءًا كبـيرًا مـن الطاقـة الحرارية الحرارية يفقـد فـى صـورة حرارة .



شكل 4-13:
فـى المحـرك الحـرارى يجـب أن يتساوى دخل الطاقة Q_h مع مجموع العادم الحرارى Q_c وخرج الشغل .

يوضح الشكل 4-13 أ رسمًا تخطيطًا لمحرك حرارى بسيط . فى مثل هذا النوع من المحركات يؤدى احتراق الوقود فى الأسطوانة إلى ارتفاع ضغط الغازات فيها ، مما يسبب حركة الكباس إلى أسفل . وتتغير هذه الحركة الخطية إلى حركة دورانية بواسطة العمود المرفقى ، وبذلك يعمل المحرك فى نفس دورة الحركة بصورة متتابعة . وبالطبع فإن كثيرًا من التفاصيل الميكانيكية ، كالصمامات وشمعات الاشتعال ، غير مبينة بالرسم . ومع ذلك فإن السمة الأساسية لهذا المحرك هى تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية .

ويوضح الشكل 4-13 ب تمثيلاً عامًا للمحرك الحرارى . ويمكن تلخيص خطوات تحويل الحرارة إلى شغل بالاستعانة بهذا الشكل كالتالى . تنساب كمية من الحرارة Q_h من خزان حرارى ذى درجة حرارة مرتفعة (ساخن) إلى المحرك ، وهذا هو دخل الطاقة للمحرك . وبعمل المحرك يتحول جزء من دخل الطاقة إلى شغل ميكانيكى ، وينساب الجزء الباقى Q_c (العادم الحرارى) إلى خزان حرارى ذى درجة حرارة منخفضة (بارد) . وعادة يكون الهواء هو الخزان البارد للمحرك ، كما فى حالة السيارة حيث تخرج العوادم الغازية الساخنة إلى الهواء عن طريق ماسورة السحب (الشكمان) .

ونظرًا لأن المحرك يجب أن يخضع لقانون بقاء الطاقة ، فإن تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية عليه بالنسبة لدورة واحدة من حركته يعطينا :

$$Q_{\text{net}} = Q_h - Q_c = W + \Delta U$$

حيث W خرج شغل المحرك لكل دورة . ولكن صافى التغير فى الطاقة الداخلية خلال دورة ديناميكية حرارية كاملة يساوى صفرًا ، $\Delta U = 0$ ، فإن المعادلة السابقة تتحول إلى الصورة :

$$W = Q_h - Q_c$$

وسوف نستخدم الآن هذه العلاقة لحساب كفاءة المحرك . من المعروف أن كفاءة أى آلة تساوى نسبة خرج الشغل إلى دخل الطاقة . وبذلك يمكننا كتابة الكفاءة فى هذه الحالة على الصورة :

$$\text{الكفاءة} = \frac{W}{Q_h}$$

وبالتعويض عن W بالقيمة المعطاة عاليه نجد أن :

$$\text{الكفاءة} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \qquad (13\text{-}3)$$

وهكذا نرى أن العادم الحرارى ، الذى يمثل الطاقة الحرارية التى لم تتحول إلى شغل ، مسئولة عن عدم كفاءة المحرك الحرارى .

وإذا أمكننا أن نجعل Q_c صفرًا ستكون كفاءة المحرك 100 فى المائة ، ولكننا سوف نستخدم الآن مفهوم الأنتروبيا لإثبات أن هذا مستحيل ، وأن هناك حدًا أعلى لا يمكن أن تزيد عنه كفاءة أى محرك حرارى .

سوف نقوم بحساب التغير فى أنتروبيا النظام المبين بالشكل 4-13 ب أثناء انسياب الحرارة إلى المحرك ومنه . ونظرا لأن المحرك يظل كما هو دون تغير تحت تأثير الانسياب الحرارى فإن أنتروبيا المحرك نفسه لا تتغير . ومع ذلك فإن الخزان الحرارى الساخن يفقد كمية قدرها Q_h من الحرارة ، كما أن الخزان البارد يكتسب كمية قدرها Q_c من الحرارة . إذن :

$$\Delta S_c = \frac{Q_c}{T_c} \qquad \text{و} \qquad \Delta S_h = \frac{-Q_h}{T_h}$$

ولكن القانون الثانى ينص على أن التغير الكلى فى الأنتروبيا يجب أن يكون أكبر من أو يساوى الصفر ، إذن :

$$\Delta S_c + \Delta S_h \geqslant 0$$

$$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_h}{T_h} \geqslant 0$$

وبنقل الحد السالب إلى الطرف الآخر والقسمة على Q_h ثم الضرب فى T_c نحصل على :

$$\frac{Q_c}{Q_h} \geqslant \frac{T_c}{T_h} \tag{13-4}$$

الآن يمكننا التعويض بهذه القيمة فى المعادلة (3-13) لنجد أن :

$$\text{الكفاءة} \leqslant 1 - \frac{T_c}{T_h} \tag{13-5}$$

أى ان الكفاءة القصوى ، طبقًا للمعادلة (5-13) ، هى :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \tag{13-6}$$

وهكذا يصل بنا التحليل السابق إلى هذه النتيجة المروعة : هناك حد أقصى لكفاءة المحرك الحرارى ، حتى أفضل المحركات الحرارية تصميمًا ، وتعتمد الكفاءة القصوى على درجتى الحرارة التى يعمل بينها هذا المحرك . ويمكننا أن نرى من المعادلة (6-13) أن الكفاءة القصوى يمكن أن تزداد إما بالحصول إلى Q_h من خزان حرارى ذى درجة حرارة عالية جدًا ، أو بصرف Q_c إلى خزان حرارى ذى درجة حرارة منخفضة جدًا . لاحظ أنه إذا أمكن صرف Q_c عند 0 K فقط فإن المحرك يمكن أن يعمل بكفاءة قدرها 100 فى الماء ، محولاً بذلك كل دخل الحرارة إلى شغل وحيث أن درجة الفضاء الخالى فى الكون تساوى 3 k تقريبًا ، فإن هذه الآلة مستحيلة . هذه نتيجة مباشرة للقانون الثانى للديناميكا الحرارية ، وهى تستخدم عادة كصيغة أخرى للقانون الثانى :

الجهاز الذى يحول 100 فى المائة من دخل الحرارة إلى شكل ميكانيكي مستحيل فيزيائيًا .

رأينا فى الفصل الثانى عشر كيف يمكن حساب الشغل والحرارة المتنقلة خلال دورة ديناميكية حرارية باستخدام الرسم البيانى PV للعمليات المتضمنة فى الدورة . وقد أثبت سادى كارنو ـ أحد الرواد فى مجال الديناميكا الحرارية ـ أن الكفاءة العظمى المعطاة بالمعادلة (13-6) يمكن أن يحققها محرك مثالى واحد تتكون دورته من التمددات والانضغاطات الأيسوثرمية والأدياباتية فقط للغازات المثالية ، ويعرف هذا المحرك باسم **محرك كارنو** . أما كفاءة المحركات الحرارية الحقيقية فتبعد كثيرًا عن الكفاءة القصوى النظرية لأسباب كثيرة كالاحتكاك وفواقد أخرى متعددة للحرارة . فكفاءة محرك السيارة مثلاً يساوى 25 فى المائة تقريبًا ، بالرغم من الكفاءة النظرية القصوى طبقًا لدرجتى الحرارة التى يعمل بينهما المحرك يجب أن تكون 80 فى المائة . كذلك فإن الكفاءة القصوى للتوربينات البخارية المستخدمة فى توليد الكهرباء تتراوح بين 60 و 65 فى المائة تقريبًا ، ولكنها فى الحقيقة تحول حوالى 45 فى المائة فقط من الطاقة الحرارية لبخار الماء الساخن المستمد من الغلايات إلى شغل ميكانيكى يستخدم فى إدارة المولدات .

من الممكن تحويل الطاقة الحرارية عالية درجة الحرارة إلى شغل بكفاءة أكبر مما فى حالة الطاقة الحرارية منخفضة درجة الحرارة . ولهذا السبب تؤخذ درجة الحرارة عادة كمقياس **لجودة الطاقة الحرارية** . وإذا وجدت مادتان عند درجتى حرارة مختلفتين فإنهما يمثلان نظامًا ديناميكيًا حراريًا أكثر نظامًا من النظام الديناميكى الحرارى الناتج بعد أن تتبادل المادتان الحرارة فيما بينهما ووصولهما إلى درجة حرارة الاتزان . كذلك يمثل الشغل حالة عالية النظام للسلوك الجزيئى (عند حركة جميع الجزيئات فى نفس الاتجاه مثلاً) ، ومن ثم فإنها حالة منخفضة الأنتروبيا . وبناء على ذلك يمكننا اعتبار أن محرك كارنو هو المحرك الحرارى الذى يؤدى إلى زيادة الأنتروبيا بأقل قدر ممكن . أما إذا خلطت الطاقة الحرارية مرتفعة درجة الحرارة ببساطة بالطاقة الحرارية منخفضة درجة الحرارة دون توليد الشغل الميكانيكى ، سوف تزداد الأنتروبيا بالقيمة القصوى . وبمجرد أن يحدث ذلك سوف تُفقد الفرصة فى الحصول على شغل ديناميكى من هذا النظام الديناميكى الحرارى المنظم أصلاً إلى الأبد .

مثال 13-3 :

يستخدم توربين بخارى فى محطة لتوليد الكهرباء تعمل بالفحم فى إدارة المولد الكهربائى . ويستقبل التوربين بخار الماء عند درجة 800 K ويصرفه كعادم عند درجة 300 K . لنعتبر محطة مصممة لتوليد القدرة الكهربائية بمعدل قدره 1000 ميجاوات (MW) . فإذا كان التوربين يعمل بالكفاءة النظرية القصوى ، فما هو معدل صرف العادم الحرارى ؟

استدلال منطقى :

سؤال : بم تتعين الكفاءة القصوى للتوربين ؟

الإجابة : بدرجتى الحرارة التى يعمل بينهما التوربين ، طبقًا لتحليل كارنو (المعادلة 6-13) :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

سؤال : ما هى علاقة الكفاءة القصوى للتوربين بمعدل صرف العادم الحرارى ؟

الإجابة : الكفاءة تساوى النسبة بين الشغل الناتج (الخرج) ودخل الحرارة Q_h كذلك يخبرنا القانون الأول للديناميكا الحرارية أيضًا أن $Q_h = W + Q_c$. حيث Q_c العادم الحرارى . وهاتان العلاقتان يمكن التعبير عنهما بدلالة القدرة .

سؤال : ماذا تمثل الكمية 1000 MW ؟

الإجابة : خرج القدرة الكهربائية المتاحة لبذل الشغل .

سؤال : ما علاقة درجتى الحرارة اللتين يعمل بينهما التوربين بالشغل W وكمية الحرارة Q ؟

الإجابة :
$$1-\frac{T_c}{T_h}=\frac{W}{Q_h}=\frac{W}{W+Q_c}=\frac{P_{out}}{P_{out}+P_{waste}}$$

الحل والمناقشة : لنحسب أولاً الكفاءة القصوى :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1-\frac{300\ K}{800\ K} = 0.625 = 62.5\%$$

(تذكر دائمًا أن تستخدم درجات الحرارة مقدرة على مقياس كلفن) . إذن :

$$0.625 = \frac{P_{out}}{P_{out}+P_{waste}}$$

ومنه نحصل على :

$$P_{waste} = \frac{P_{out}}{0.625} - P_{out} = \frac{1000\ MW}{0.625} - 1000\ MW = 1600\ MW$$

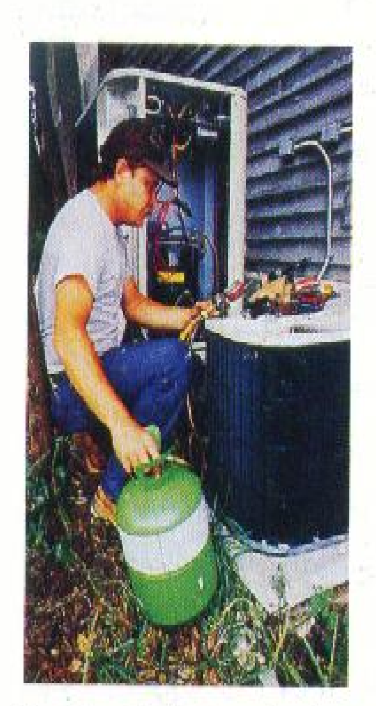
هذا يعنى أنه يجب إمداد التوربين بالطاقة فى صورة بخار ذى درجة حرارة عالية بمعدل قدره 1000 MW + 1600 MW = 2600 MW .

تمرين : كفاءة المحركات البخارية الحديثة حوالى 45 فى المائة . ما هما القيمتان الواقعيتان لمعدلى صرف العادم الحرارى ودخل الحرارة لمثل هذا التوربين ؟

الإجابة : $P_{waste} = 2200$ MW و $P_{in} = 3200$ MW . **لاحظ أن انخفاض الكفاءة بنسبة 17.5 فى المائة يؤدى إلى زيادة العادم الحرارى بنسبة 39 فى المائة لنفس مستوى خرج القدرة .**

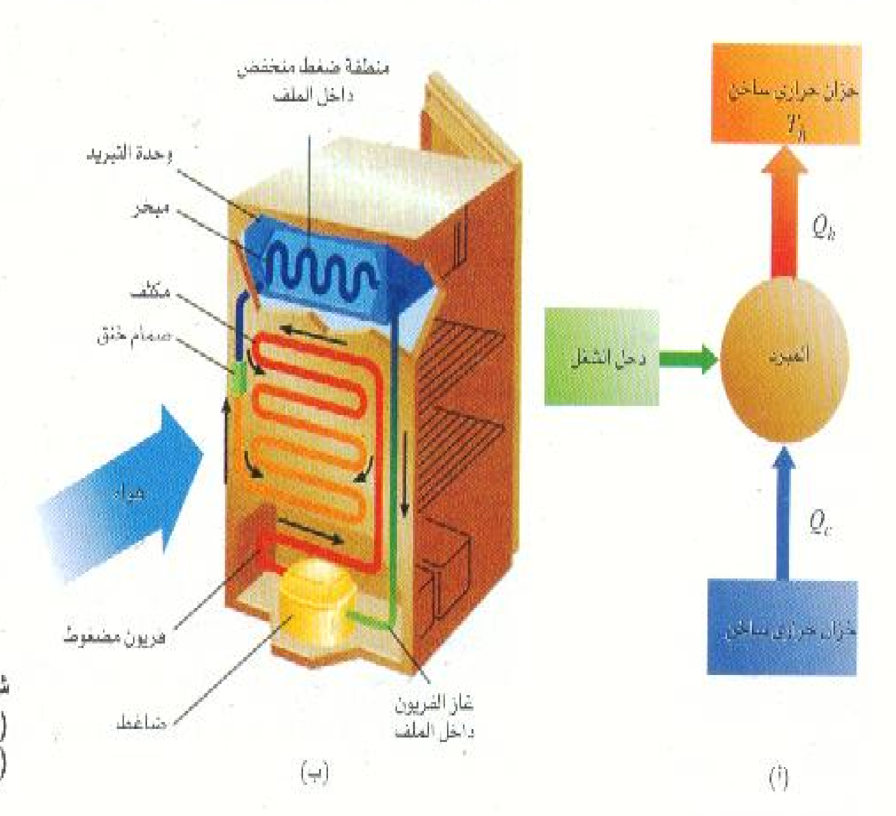
13-4 أنظمة التبريد

هناك حالات كثيرة يكون المطلوب فيها تبريد مادة ما بدون خلطها مع مادة أخرى أبرد منها ، وليس استخلاص الشغل من الطاقة الحرارية . والقانون الثانى لا يسمح بحدوث ذلك تلقائيًا لأن هذه العملية تتطلب أن يصبح الجسم البارد أكثر برودة من الوسط المحيط به . ومع أن القانون الثانى يحرم انسياب الحرارة من الجسم البارد إلى الساخن ، يمكننا بذل شغل على النظام لإجبار الحرارة على « صعود تل » درجات الحرارة ، وهو ما يشبه إلى حد كبير ضخ الماء إلى أعلى ضد الجاذبية وتسمى العملية التى يستخدم فيها الشغل لخفض درجة حرارة المادة **بدورة التبريد** ، وهذه فى الحقيقة هى أساس عمل العديد من أنظمة التبريد كالمبردات (الثلاجات) وأجهزة تكييف الهواء والمضخات الحرارية .



يقوم فنى التبريد باختبار وضبط كمية الفريون فى جهاز تكييف الهواء المبين بالصورة . الضاغط هو الجسم الأسود فى خلفية الصورة . يوجد أحد المبادلات الحرارية ، بما فيه المروحة ، داخل الوحدة الزرقاء الظاهرة فى مقدمة الصورة .

وفى دورة التبريد يتم انسياب الطاقة أساسيًا فى عكس اتجاه انسيابها فى المحرك الحرارى ، كما هو مبين بالشكل 5-13 أ . فإذا كانت دورة التبريد تتم بين درجتى الحرارة العالية T_h والمنخفضة T_c سنجد أن دخل الشغل W سوف يسمح للجهاز بانتزاع كمية من الحرارة Q_c عند درجة الحرارة المنخفضة وصرف كمية من الحرارة Q_h كعادم حرارى عند درجة الحرارة العالية . ومرة ثانية فإن القانون الأول للديناميكا الحرارة يتطلب أن تتساوى كمية الطاقة الداخلة مع كمية الطاقة الخارجة ، أو :



شكل 5-13:
(أ) انسياب الحرارة فى نظام تبريد .
(ب) رسم تخطيطى لمبرد (ثلاجة) .

$$Q_c + W = Q_h \qquad (13\text{-}7)$$

يمثل الشكل 5-13 ب رسمًا تخطيطيًا لثلاجة منزلية . ويتم التبريد فى مثل هذا النوع من الأجهزة باستخدام سائل ذى نقطة غليان منخفضة كالفريون الذى يغلى عند درجة 30°C- عند الضغط الجوى . لنتتبع الآن دورة التبريد فى هذه الثلاجة . فى بداية الدورة يقوم الضاغط الموجودة بالجزء السفلى من وحدة التبريد بضغط غاز الفريون إلى ضغط عال بدرجة تكفى لإسالته عند تبريده قليلاً . وأثناء هذا الانضغاط الأدياباتى تقريبًا يسبب الشغل W المبذول على الغاز تسخينه بدرجة كبيرة . وبعدئذ يمر الفريون الساخن فى ملفات المكثف ، حيث يفقد بعضًا من حرارته عند درجة الحرارة العالية إلى الهواء المحيط . (عندما تقترب من ظهر الثلاجة يمكنك الإحساس بسخونة الهواء قرب الملفات) . وتؤدى عملية تبريد الفريون هذه إلى تحوله إلى الطور السائل نتيجة فقده لحرارة تبخيره إلى الهواء المحيط . لاحظ أن الحرارة المفقودة أثناء التبريد وأثناء التحول الطورى تمثل جزءًا من Q_h . وبعد انخفاض درجة حرارة الفريون السائل إلى ما يقرب من درجة الغرفة يمر هذا الفريون السائل خلال ملف الخنق حيث يتبخر لتمدده فى منطقة منخفضة الضغط تسمى **المبخر** . (انظر المثال التوضيحى 3-12) . وبمرور الفريون الغازى ، الذى أصبح الآن باردًا جدًا ، فى الأنابيب الملتوية للمبخر سوف تنساب كمية من الحرارة Q_c من محتويات المبرد الدافئة إلى الفريون ، مما يؤدى إلى تبريد داخل الثلاجة . وأخيرًا يترك الفريون الغازى (بعد أن أصبح دافئًا) ، أنابيب المبخر عائدًا مرة أخرى إلى الضاغط حيث تتكرر دورة التبريد مرة أخرى .

وتعمل أجهزة تكييف الهواء بنفس هذه الطريقة . ولكن ملفات التبريد توجد فى هذه الحالة داخل المنزل . بينما توجد ملفات التكثيف فى الخارج . وبذلك تنقل الحرارة من داخل المنزل إلى خارجه ، وهذا يؤدى إلى تبريد الداخل وتسخين الخارج . (ضع يدك بالقرب من جهاز التكييف خارج المنزل وسوف تشعر بالحرارة المنصرفة Q_h) .

تبين المعادلة (7-13) أن $Q_h > Q_c$ بكمية تساوى الشغل المبذول بواسطة الضاغط :

$$W = Q_h - Q_c$$

ولقياس فاعلية المبرد سوف نعرف **معامل الأداء COP** بأنه النسبة بين كمية الحرارة المنتزعة عند درجة الحرارة المنخفضة ودخل الشغل اللازم :

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} \qquad (13\text{-}8)$$

وباستخدام المعادلة (6-13) لحذف W نحصل على :

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \qquad (13\text{-}9)$$

لاحظ من المعادلة (9-13) أن قيمة COP ـ نسبة الحرارة المنتزعة إلى دخل الشغل ـ أكبر دائمًا من 1 . هذا يوضح أن كمية صغيرة من الشغل يمكنها انتزاع كمية أكبر من الحرارة .

وكما فعلنا في حالة المحرك الحراري ، يمكننا استخدام اعتبارات الأنتروبيا بالقانون الثاني للتعبير عن كميتي الحرارة المتنقلتين بدلالة درجتي حرارة الخزانين الحراريين اللتين يتم عندهما التبادل الحراري . وعندئذ سنجد أن معامل الأداء الأقصى لمبرد يعطى بالعلاقة :

$$\text{COP} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad \text{(الأقصى)} \qquad (13\text{-}10)$$

لاحظ أن أفضل أداء (أعلى COP) يتحقق عندما يكون الفرق بين درجتي الحرارة صغيرًا . وهذا معقول لأن الشغل اللازم لإجبار الحرارة على الانسياب إلى خزان حراري ذي درجة حرارة أعلى قليلاً سيكون أصغر مما في حالة انتقال الحرارة إلى خزان حراري ذي درجة حرارة أعلى بكثير .

تعتبر المضخات الحرارية مثالاً آخر لاستخدام دورة التبريد . وتصنع هذه بحيث تحتوي على مجموعتين من ملفات التبريد ، مما يسمح باستخدام المضخة الحرارية كمكيف للهواء ، حيث توجد ملفات المبخر داخل المنزل ، أو كوحدة تدفئة حيث توجد ملفات المكثف داخل المنزل وبالتالي يصرف العادم الحراري داخل الغرفة . وفي الحالة الأخيرة يتم تسخين المبنى بواسطة الطاقة الحرارية المنتزعة من الجو الخارجي البارد بعد رفع درجة حرارتها تحت تأثير الشغل المبذول بواسطة الضاغط .

ويختلف الغرض من استخدام المضخات الحرارية للتدفئة اختلافًا بسيطًا عن جهاز تكييف الهواء . ذلك أن وظيفة المضخة الحرارية هي نقل الحرارة Q_h إلى المنزل بدلاً من انتزاع الحرارة Q_c . وحيث أن COP مؤشر ومقياس لفاعلية أداء الجهاز للوظيفة المطلوبة منه ، يجب تعريف COP للمضخة الحرارية بالطريقة الآتية :

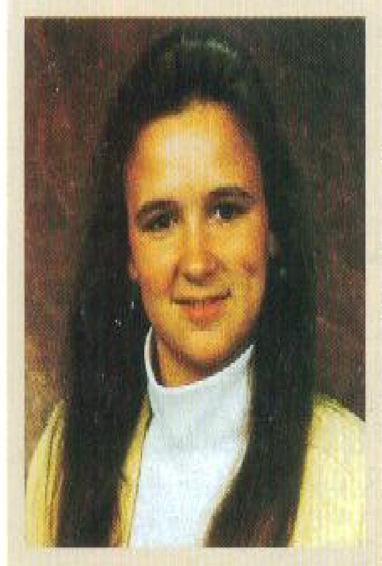
$$\text{COP} = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c} \quad \text{(للمضخة الحرارية)} \qquad (13\text{-}11)$$

وبذلك يأخذ COP الأقصى للمضخة الحرارية الصورة :

$$\text{COP} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad \text{الأقصى (للمضخة الحرارية)} \qquad (13\text{-}12)$$

لاحظ الفرق البسيط بين المعادلتين (11-13) و (12-13) للمضخة الحرارية والمعادلتين (9-13) و (10-13) للمبرد .

الفيزيائيون يعملون كارين سان جيرمان ، جامعة نبراسكا ، لينكولن



عملت خلال السنوات الست الأخيرة في مجال يسمى « الاستشعار عن بعد » ، وهو مجال فيزيائي في جزء منه وهندسي في الجزء الآخر . ويمكن تعريف الاستشعار عن بعد عموماً بأنه جمع المعلومات الفيزيائية عن جسم أو موقع دون الاضطرار إلى الانتقال إلى ذلك الجسم أو الموقع .

وتتلخص إحدى الطرق المستخدمة لهذا الغرض في إرسال الطاقة الكهرومغناطيسية ثم استقبالها بعد انعكاسها على الجسم (أو الأجسام) . ومن الأمثلة التطبيقية المألوفة لهذه الطريقة يمكننا ذكر الصور الرادارية التي نشاهدها في نشرات الطقس المسائية على شاشة التليفزيون ، حيث تكون الأجسام العاكسة هنا هي قطرات المطر ، وتكون المعلومات المطلوبة هي كمية المطر المتوقع وتعتمد الطريقة الثانية للاستشعار عن بعد ببساطة على قياس الإشعاع الطبيعي المنبعث من الجسم أو المنظر موضع الاهتمام باستخدام أجهزة تسمى الراديومترات (مقاييس الإشعاع) . وربما كان أشهر أمثلة هذا النوع من الاستشعار عن بعد هو جهاز استقبال الأشعة تحت الحمراء المستخدم لقياس درجة الحرارة الفيزيائية للمنظر ، والمستخدم في أجهزة الرؤية الليلية لرؤية الأجسام الدافئة ، كالأشخاص (تذكر نظارات الأشعة تحت الحمراء المستخدمة في فيلم **سكوت الحملان** ؟) والحيوانات والآلات .

وفي الوقت الحالي تنحصر اهتماماتي بالمشاركة في دراسة البيئة الأرضية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد للإجابة عن مختلف الأسئلة الجيوفيزيائية ، وهذا يتضمن كلاً من الاهتمامات قصيرة المدى كالإنذار المبكر عن الكوارث الطبيعية ، وطويلة المدى كالدراسات المناخية والاستيطانية .

كان بحثي الأول في مشروع التخرج ينتمي إلى مجموعة بحوث الاستشعار عن بعد القريبة المدى ، وهو بحث متعلق بصعوبة التنبؤ بكيفية تزايد شدة الأعاصير المتحركة بسرعة كبيرة فوق المحيط وتوقيت وصولها إلى البر . وفي الوقت الحالي تصدر الإنذارات عن الأعاصير التي تصل فعلاً إلى البر وعلى بعد 300 ميلاً في المتوسط عن خط الشاطئ ، بتكاليف قدرها 30.000 $ لكل ميل . ومع ذلك فإن تحسين مثل هذا التنبؤ بنسبة 10 في المائة فقط لعاصفة واحدة يمكن أن يوفر المال اللازم لتمويل أبحاث الأعاصير لسنة كاملة .

تقول تقارير مركز أبحاث الأعاصير* إن مفتاح المعلومات المفقودة هو سرعة الريح عند سطح المحيط . ومن الطبيعي أنه يمكن قياس سرعة الريح بإرسال سفينة لقياسها أثناء العاصفة ، ولكن هذه الطريقة في منتهى الخطورة لأسباب واضحة . كذلك فإن استعمال طائرات الاستطلاع لقياس سرعة الريح على ارتفاعات صغيرة فوق سطح البحر أمر لا يخلو أيضاً من الخطورة . ولهذا فإن الحل المعقول لهذه المشكلة هو استخدام مبادئ الاستشعار عن بعد بتصميم راديومتر مناسب يمكن تركيبه بحيث يكون موجهاً إلى أسفل في باطن الطائرة من الخارج . هذا الجهاز يقوم بقياس الإشعاع الطبيعي الآتي من المحيط ، والذي يرتبط ارتباطاً مباشراً بدرجة تموج وخشونة سطحه ، وهذه بدورها تعتمد على سرعة الرياح بالقرب من السطح . وبعد اختبار هذه الفكرة لعدة فصول متعاقبة يمكننا الآن قياس السرعة السطحية للإعصار بنجاح أثناء طيران طائرات الاستطلاع على الارتفاعات المأمونة . ويعود الفضل لهذا المشروع في قيامي بالطيران خلال أول إعصار في حياتي - إعصار جيلبرت في خريف 1988 ؛ ويمكنني أن أؤكد لكم أنه كان أكثر متعة وحيوية من ركوب الأفعوانية في مدينة الملاهي .

* Hurricane Research Center .

من الواضح إذن أن الهدف من بحثى فى مجال الأعاصير هو تحسين التنبؤ بشدة الأعاصير وتوقيت وصولها إلى اليابسة ، ولكن موضوع الاستشعار عن بعد يهتم فى المقام الأول بأهداف بعيدة المدى للدراسات البيئية . فمع زيادة الاهتمام بتغير المناخ على سطح الأرض عمومًا والمناقشات المستفيضة عن ظاهرة البيوت الزجاجية أصبح من المقبول علميًا أن مساحة المنطقة الثلجية وسمك الثلج فى المناطق القطبية يجب أن يكون حساسًا حتى للتغيرات الطفيفة فى متوسط درجة الحرارة على سطح الأرض . ورغم أن الأقمار الصناعية تمدنا يوميًا بقياسات عديدة لاتساع نطاق الثلج القطبى ، فإن سمك الطبقة الثلجية مازال محيرًا . ومع ذلك فإن لدينا برهانًا معمليًا على أن الإشعاع الدقيق الطبيعى المنبعث من الثلج الطافى على الماء مرتبط بسمك الثلج ؛ وهذا يدل على أن قياس الإشعاع الطبيعى للثلج فى المناطق القطبية باستعمال الأقمار الصناعية سوف يمكننا من رسم خريطة تفصيلية لسمك الثلج فى تلك المناطق .

ولكن قبل البدء فى هذا المشروع الضخم باستخدام الأقمار الصناعية كان من الضرورى إجراء دراسات ميدانية « لاختبار صحة المفهوم » . وفى يوليو من عام 1989 قمنا بتركيب راديومتر فائق الحساسية على جانب كاسحة جليد ألمانية مخطط لقيامها برحلة إلى القارة القطبية الجنوبية فى أغسطس التالى . وبينما كانت السفينة تتحرك خلال ثلج البحر ، كان الراديومتر يقوم بقياس الإشعاع الذى قورن بنجاح فيما بعد بالقياسات الفعلية للسمك ، وكانت النتائج رائعة حقًا . وبالإضافة إلى ما أنجزته فى هذا المشروع من أهدافى البحثية ، كانت هذه فرصة ذهبية لى للتعرف والتعامل مع علماء من ألمانيا وروسيا وكولومبيا والولايات المتحدة وكندا . وحيث أن هذا الوقت من السنة كان فصل الربيع فى نصف الكرة الجنوبى فقد تمتعنا بمظاهر الطبيعة الخلابة هناك ممثلة فى طيور البطريق الأباطرة وعجول البحر (الفقمات) والحيتان القاتلة وطيور النوء الجميلة . وختامًا لهذه الرحلة البحثية الناجحة ؛ بعد وصولنا إلى إحد موانئ أفريقيا ؛ قمنا مع بعض أصدقائنا الجدد برحلة رائعة فى برارى أفريقيا .

إن حبى لفهم سلوك الأشياء هى ما جذبنى أصلاً إلى الفيزياء والهندسة ، ولم أكن أتوقع إطلاقًا مدى المتعة والإثارة فى السعى وراء مثل هذا الفهم . وإننى أعنى بذلك الرحلات المرتبطة بالبحوث الميدانية وحرية الاتصال بالهيئات العلمية ذات الشهرة العالمية مثل NASA والعمل مع علماء فى تخصصات أخرى ونمو معرفتى شيئًا فشيئًا عن الدورات المناخية والأعاصير وطيور البطريق .

مثال توضيحى 1-13

ما هى كمية الشغل اللازم بذله على مضخة حرارية لنقل كمية قدرها 1000 J من الحرارة إلى داخل غرفة ، إذا كانت درجة حرارة المكثف 40°C ودرجة الحرارة بالخارج 0°C ؟ افترض أن المضخة الحرارية تعمل بأقصى COP (وهذا مستحيل فى الحقيقة) .

استدلال منطقى : فى هذه الحالة $T_h = 313\ K$ و $T_c = 273\ K$. وبذلك يكون COP الأقصى لهاتين القيمتين من درجة الحرارة :

$$\frac{313\ K}{313\ K - 273\ K} = 7.8$$

وهذه القيمة تمثل نسبة كمية الحرارة المنقولة Q_h إلى دخل الشغل W . وحيث أن $Q_h = 1000\ J$ ، إذن :

$$W = \frac{Q_h}{COP} = \frac{1000\ J}{8.7} = 130\ J$$

أى أن المضخة الحرارية تنقل إلى الغرفة كمية من الحرارة قدرها 7.8 ضعفًا قدر الشغل المستهلك فى صورة الكهرباء اللازمة لعمل الضاغط . هذا فى حالة المضخة الحرارية المثالية . أما بالنسبة إلى المضخات الحرارية الفعلية التى تعمل بين نفس درجتى الحرارة فإن COP يساوى 3-4 فقط ، ولذلك فإنها تستهلك كمية أكبر من الشغل .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الأنتروبيا ، (ب) الحالة الميكروئية والحالة الماكروئية ، (جـ) محرك كارنو ، (د) المحرك الحرارى ، (هـ) أنظمة التبريد ، (و) كفاءة المحرك الحرارى ، (ز) معامل أداء نظام التبريد .

2 ـ إعطاء بعض الأمثلة للأنظمة الفيزيائية التى تصبح غير منظمة إذا تركت لحالها . اشرح لماذا لا تشاهد العملية العكسية فى كل حالة .

3 ـ التغير فى أنتروبيا نظام بسيط أثناء تغير أيسوثرمى .

4 ـ شرح العلاقة بين الانتروبيا والاحتمالية ، واستخدام علاقة بولتزمان لحساب الأنتروبيا وتغير الأنتروبيا للأنظمة البسيطة .

5 ـ ذكر القانون الثانى للديناميكا بدلالة (أ) اتجاه سريان الحرارة بين نظامين مختلفين فى درجة الحرارة ، (ب) ظاهرة الاتزان الديناميكى الحرارى ، (جـ) درجة النظام فى النظام الديناميكى الحرارى ، (د) تحول الحرارة إلى شغل بواسطة المحرك الحرارى .

6 ـ تعريف المحرك الحرارى ونظام التبريد بدلالة الوظيفة وانسياب الحرارة .

7 ـ إجراء الحسابات البسيطة باستخدام مفهومى الكفاءة ومعامل الأداء .

8 ـ التعرف على مركبات دورة التبريد . شرح الفرق بين تطبيقات دورة التبريد فى المبردات وأجهزة تكييف الهواء والمضخات الحرارية .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

القانون الثانى للديناميكا الحرارية

1 ـ تنتقل الحرارة دائمًا من درجة الحرارة العالية إلى درجة الحرارة المنخفضة .

2 ـ يميل النظام المعزول إلى الحالة ذات أعلى درجة من اللانظام (الفوضى) . هذه أيضًا هى الحالة ذات أعلى احتمالية .

3 ـ عندما تتغير حالة نظام معزول يكون التغير فى الأنتروبيا أكبر من أو يساوى الصفر .

4 ـ من المستحيل للمحرك الحرارى تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل بكفاءة قدرها 100% .

الأنتروبيا (S)

الأنتروبيا دالة للحالة الديناميكية الحرارية ، وتعرف بدلالة احتمالية Ω حدوث حالة معينة :

$$S = k \ln \Omega$$

تزداد الأنتروبيا عند إضافة الحرارة إلى النظام وتقل عند فقده لها . يعطى تغير الأنتروبيا فى العمليات الأيسوثرمية بالعلاقة :

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad \text{(للعمليات الأيسوثرمية)}$$

الوحدات SI للأنتروبيا هى J/K .

كفاءة المحرك الحرارى

$$\text{الكفاءة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{دخل الحرارة}} = \frac{W}{Q_h}$$

الكفاءة القصوى لمحرك حرارى يعمل بين درجتى الحرارة T_c ، T_h هى :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1-\frac{T_c}{T_h}$$

معامل أداء المبرد والمضخة الحرارية

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W_{in}} \quad \text{(للمبرد)}$$

$$\text{COP} = \frac{Q_h}{W_{in}} \quad \text{(للمضخة الحرارية)}$$

معامل الأداء الأقصى لمبرد ومضخة حرارية يعملان بين درجتى الحرارة T_c ، T_h هما :

$$\text{COP} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad \text{الأقصى (للمبرد)}$$

$$\text{COP} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad \text{الأقصى (لمضخة حرارية)}$$

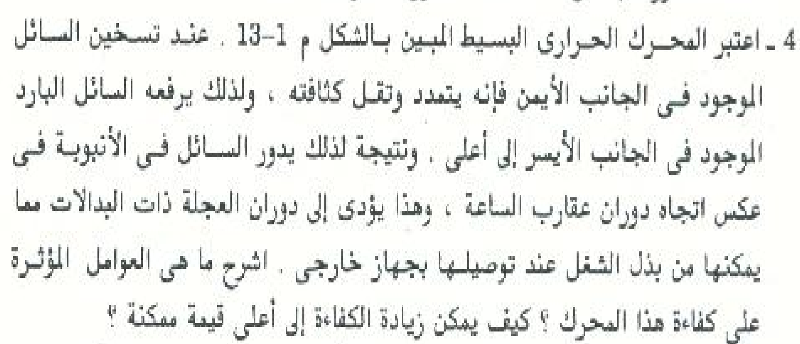
أسئلة وتخمينات

1 ـ افترض أن لديك صندوقًا مفرغًا تفريغًا جيدًا يحتوى على خمسة جزيئات فقط من غاز ما ، ويحدث أحيانًا أن تتواجد كل هذه الجزيئات الخمسة فى أحد نصفى الصندوق كيف يمكنك التوفيق بين هذا الموقف والقانون الثانى ومناقشتنا عن اللانظام .

2 ـ يدعى بعضهم أن بالإمكان تبريد بطيخة بلفها فى بطانية مبللة وتركها فى النسيم حتى إذا كانت درجة الحرارة عالية . ألا يتناقض هذا مع القانون الثانى ؟

3 ـ قدر معدل تغير أنتروبيا شخص عندما يتسكع هنا وهناك . متوسط معدل الأيض (التمثيل الغذائى ؛ أى معدل استهلاك الطاقة المخزونة) للفرد تحت هذه الظروف حوالى 100 W .

4 ـ اعتبر المحرك الحرارى البسيط المبين بالشكل م 1-13 . عند تسخين السائل الموجود فى الجانب الأيمن فإنه يتمدد وتقل كثافته ، ولذلك يرفعه السائل البارد الموجود فى الجانب الأيسر إلى أعلى . ونتيجة لذلك يدور السائل فى الأنبوبة فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة ، وهذا يؤدى إلى دوران العجلة ذات البدالات مما يمكننا من بذل الشغل عند توصيلها بجهاز خارجى . اشرح ما هى العوامل المؤثرة على كفاءة هذا المحرك ؟ كيف يمكن زيادة الكفاءة إلى أعلى قيمة ممكنة ؟



شكل م1-13

5 ـ لكل نرد (زهر الطاولة) ستة أوجه تحمل نقطًا عددها من 1 إلى 6 . إذا ألقى زوج من النرد على المنضدة ، فما هى النسبة بين احتمال أن يكون مجموع الوجهين x واحتمال أن يكون مجموعهما y عندما :

(أ) $y = 3$ و $x = 2$ ، (ب) $y = 4$ و $x = 2$.

6 ـ أراد طفل تبريد مطبخ منزله ففتح باب الثلاجة الكهربائية وتركه مفتوحًا . هل تنجح هذه الفكرة ؟ أجب عن هذا السؤال من وجهة نظر المدى القريب والمدى البعيد . هل يختلف الموقف إذا استخدمت ثلاجة من النوع القديم (صندوق الثلج) بدلاً من الثلاجة الكهربائية ؟

7 ـ ما زالت الشمس إلى الآن مصدرنا الرئيسي للطاقة التي نستخدمها على الأرض . تتبع هذه الطاقة الشمسية من مصدرها خلال استخداماتنا وإثبت عدم وجود أي تناقض مع القانون الثاني . اهتم بشكل خاص بعملية التنظيم التي تحدث في التمثيل الضوئي .

مسائل

القسم 13-1

1 ـ ألقيت ثلاث قطع عملة معدنية ملونة بألوان مختلفة بطريقة عشوائية . (أ) ما عدد الطرق المختلفة لظهور مجموعات الصورة والكتابة على الأوجه العلوية ؟ (ب) ما هي احتمالية ظهور الصورة على جميع الأوجه العلوية ؟ (جـ) ما هي احتمالية ظهور صورتين وكتابة واحدة على الأوجه العلوية ؟

2 ـ ألقي زوج من أحجار النرد على المنضدة . (أ) كم عدد الطرق لأن يكون مجموع الوجهين العلويين 5 ؟ وما هي احتمالية ألا يكون المجموع 5 ؟ (ب) بكم طريقة يمكن أن يكون المجموع 11 ؟ وما هي احتمالية ألا يكون المجموع 11 ؟ (جـ) ما هو المجموع الأكبر احتمالية ؟ ، وما قيمة هذه الاحتمالية ؟

■ 3 ـ دعيت إلى مباراة في النرد على كوكب محايد يستعلمون فيه « نردًا » على هيئة مجسمات ذات أربع أوجه مثلثية تحمل أرقاما من 1 إلى 4 . وينص قانون هذه المباراة على استعمال **ثلاث** قطع من هذا النرد ، وأن يحسب مجموع الأوجه السفلية بعد كل رمية . (أ) كون جدولاً لاحتمالية كل التوافيق الممكنة لهذه القطع الثلاث . كما عدد الترتيبات المختلفة الممكنة ؟ (ب) ما عدد الطرق التي يمكن أن يكون فيها مجموع الأوجه السفلية 5 ؟ وما عدد الطرق لتكوين مجموع قدره 11 ؟ ما قيمة الاحتمالية في كل من هاتين الحالتين ؟ (جـ) ما هو المجموع الأكبر احتمالاً ، وما قيمة احتمالية هذا المجموع ؟

4 ـ ارسم رسمًا بيانيًا لتوزيع الاحتمالية في مسألتي النرد 3 و 4 بتمثيل احتمالية كل مجموع على المحور الرأسي مقابل المجموع على المحور الأفقي .

■ 5 ـ عند إلقاء عدد قدره N من قطع العملة المعدنية المميزة بعلامات يكون عدد التوافيق الممكنة من الصورة والكتابة 2^N . ما هو عدد التوافيق الممكنة عند استعمال (أ) 3 قطع ، (ب) 5 قطع ، (جـ) 50 قطعة .

6 ـ وقعت تسع نملات في صندوق فلم تجد أمامها إلا أن تتحرك فيه حركة عشوائية . (أ) استخدم الشرح المعطى بالمسألة 5 لتعيين احتمالية أن توجد كل النملات التسع في النصف الأيسر للصندوق . (ب) ما هي احتمالية وجود ثمان نملات في النصف الأيسر وواحدة في النصف الأيمن ؟

القسم 13-2

7 ـ ما مقدار التغير في أنتروبيا 315 g من الزئبق عند تحولها من الطور السائل إلى الطور الصلب عند نقطة انصهاره وقدرها $-39°C$ ؟

8 ـ ما مقدار التغير في أنتروبيا كمية من الماء كتلتها 2.3 g عند تجمدها عند درجة $0°C$ ؟

9 ـ معدل انبعاث الطاقة من شخص بالغ متوسط يجلس ساكنًا لفترة طويلة يساوى 105 W تقريبا . ما معدل تغير أنتروبيا هذا الشخص ؟

10 ـ سخنت خمسة كيلو جرامات من الماء ببطئ من درجة $27°C$ إلى $37°C$. ما هي القيمة التقريبية للتغير في أنتروبيا هذه الكمية من الماء ؟

■ 11 ـ تمددت عينة من الهليوم كتلتها 9 g أيسوثرميًا عند درجة حرارة قدرها $-90°C$ إلى حجم يساوى 3.75 مرة قدر حجمها

الأصلى . ما قيمة التغير فى أنتروبيا الهليوم ؟

■ 12 ـ نظام مكون من إنائين درجة حرارة أولهما 350 K ودرجة حرارة الآخر 290 K ويحتوى كل منهما على 6.5 مولاً من غاز الهيدروجين H_2 . هذان الإناءان معزولان عزلاً حرارياً جيدًا عن الوسط المحيط ، ولكنهما متلامسان أحدهما مع الآخر بحيث يمكن أن تنساب الحرارة بحرية من الإناء الساخن إلى البارد . (أ) أوجد تغير أنتروبيا كل من العينتين بعد أن تنخفض درجة حرارة الإناء الساخن إلى 340 K . كرر الجزء (أ) عندما يكون الإناءان قد وصلا على درجة حرارة الاتزان . (جـ) أوجد التغير الكلى فى الأنتروبيا فى الجزئين (أ) و (ب) .

■ 13 ـ رجت خمس قطع عملة معدنية فى كوب بشدة ثم ألقيت على منضدة . ما هى قيم الأنتروبيا عندما يظهر على الأوجه العلوية (أ) 1 صورة ، 4 كتابة ، (ب) 3 صورة ، 2 كتابة ، (جـ) 5 صور .

القسم 3-13

14 ـ يستخدم محرك حرارى الجزء الداخلى لفرن ساخن درجة حرارته 850°C كخزان للطاقة الحرارية الساخنة وهواء درجة حرارته 65°C كخزان بارد . ما هى الكفاءة العظمى للمحرك تحت هذه الظروف ؟

15 ـ فى المحركات التوربينية البخارية الحديثة يكون دخل الحرارة على هيئة بخار درجة حرارته حوالى 600°C ، ويصرف العادم الحرارى إلى مكثف درجة حرارته حوالى 70°C . ما قيمة أكبر كفاءة ممكنة لمثل هذا التوربين البخارى ؟

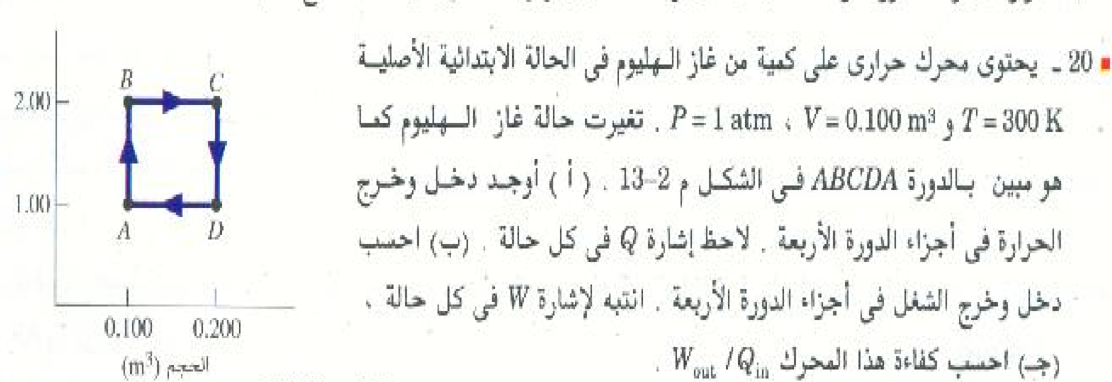
16 ـ تعمل المحركات التوربينية البخارية الفعلية بكفاءة قدرها 46 فى المائة تقريبًا . إذا كانت قدره أحد هذه المحركات 500 MW ، (أ) ما هى كمية الحرارة التى يعطيها المحرك إلى الوسط الخارجى ذى درجة الحرارة المنخفضة خلال 24 h ؟ (ب) ما هى كمية الطاقة التى يستمدها المحرك من البخار ذى درجة الحرارة العالية خلال نفس الفترة ؟

17 ـ افترض أنك قد تركت مصباحًا كهربائيًا قدرته 100 W مضاء بصفة مستمرة شهرًا كاملاً (30 يومًا) . فإذا كانت مولدات شركة الكهرباء التى تمد مصباحك بالطاقة تعمل بكفاءة قدرها 30 فى المائة ، فما مقدار الطاقة الحرارية المنصرفة إلى البيئة نتيجة لهذا السهو ؟

■ 18 ـ تتولد الحرارة عند احتراق الجازولين بمعدل قدره 50,000 J/g (هذه الكمية تسمى **حرارة احتراق الجازولين**) . إذا كانت كفاءة محرك سيارة 25 فى المائة ، فما هى كمية الجازولين المحترقة فى الساعة علمًا بأن قدرة المحرك 50 hp ؟ عبر عن هذه الإجابة بالكيلوجرامات فى الساعة والجالونات فى الساعة .

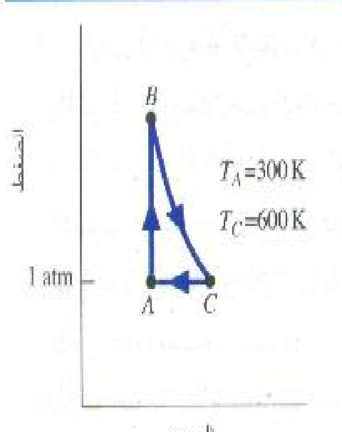
■ 19 ـ الكفاءة الإجمالية لوحدات توليد القدرة النووية الحديثة حوالى 30 فى المائة ، بينما تصل الكفاءة الإجمالية للوحدات التى تعمل بالوقود الأحفورى إلى 40 فى المائة نظرًا لارتفاع درجة حرارة البخار المستخدم لإدارة التوربينات قارن معدل انبعاث الحرارة من وحدة نووية ومعدل انبعاثها من وحدة تعمل بالوقود الأحفورى إذا كان خرج قدره كل منهما 1000 MW .

■ 20 ـ يحتوى محرك حرارى على كمية من غاز الهليوم فى الحالة الابتدائية الأصلية $P = 1$ atm ، $V = 0.100$ m³ و $T = 300$ K . تغيرت حالة غاز الهليوم كما هو مبين بالدورة $ABCDA$ فى الشكل م 2-13 . (أ) أوجد دخل وخرج الحرارة فى أجزاء الدورة الأربعة . لاحظ إشارة Q فى كل حالة . (ب) احسب دخل وخرج الشغل فى أجزاء الدورة الأربعة . انتبه لإشارة W فى كل حالة ، (جـ) احسب كفاءة هذا المحرك W_{out}/Q_{in} .



شكل م 2-13

■■ 21 ـ يعمل محرك حرارى يحتوى على 2 mol من غاز مثالى فى الدورة الديناميكية الحرارية الموضحة بالشكل م 3–13 والمكونة من العملية الأيسوكورية AB والعملية الأدياباتية BC والعملية الأيسوبارية CA . (أ) احسب Q و W لكل من هذه العمليات . (ب) احسب كفاءة هذا المحرك . (جـ) احسب الكفاءة القصوى لأى محرك يعمل بين درجتى حرارة هذه الدورة .



شكل م 3–13

القسم 4–13

■ 22 ـ القدرة المطلوبة لكى يعمل مبرد معين تساوى 0.90 kW ، وعندئذ يستطيع هذا المبرد نقل الحرارة من داخله بمعدل قدره 560 cal/s . ما قيمة COP لهذا المبرد ؟ بأى معدل تنطلق الحرارة إلى الحجرة الموجود بها هذا المبرد ؟

■ 23 ـ القدرة المطلوبة لكى يعمل مكيف هواء تساوى 0.90 kW ، وعندئذ ينصرف العادم الحرارى إلى الهواء الطلق بمعدل قدره 560 calories فى الثانية . كم سعرًا ينقله هذا المكيف من الغرفة التى يجرى تبريدها فى الثانية الواحدة ؟ عبر عن هذه النتيجة بالوحدة الحرارية البريطانية فى الساعة . ما قيمة COP لمكيف الهواء ؟

■ 24 ـ لنفرض أن COP لمبرد معين يساوى 5.5 . (أ) ما مقدار الطاقة المستهلكة لإزالة 1850 cal من داخله ؟ (ب) ما قيمة القدرة المقدرة لهذا المبرد إذا كان يستطيع إزالة 1850 cal من داخله كل دقيقة ؟

25 ـ ركب بعضهم مضخة حرارية فى منزلهم فوجد أنه ينقل الحرارة إلى داخل المنزل عند درجة حرارة قدرها 40°C . قارن أكبر COP ممكن لهذه المضخة الحرارية إذا كانت درجة الحرارة الخارجية (أى درجة حرارة الخزان الحرارى البارد) ، (أ) 0°C ، (ب) -30°C .

مسائل عامة

■ 26 ـ وضع طبق طعام ساخن فى مبرد (ثلاجة) درجة حرارته الداخلية 5°C . فإذا كانت كمية الحرارة التى يجب أن يفقدها هذا الطبق لتبريده إلى 5°C تساوى 220,000 J ، (أ) ما هى كمية الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الضاغط إذا كانت درجة حرارة الغرفة 23°C ؟ بفرض أن المبرد يعمل بنصف COP الأقصى النظرى له . (ب) كم يتكلف تبريد الطبق إذا كانت تكاليف الطاقة الكهربائية المستهلكة $0.075/kWh ؟

■ 27 ـ قرر عالم يعيش على كوكب شبيه بالأرض ، ويعلم الكثير من علومها ، بناء مقياس لدرجة الحرارة على أساس مبدأ أقصى تحويل للطاقة الحرارية إلى شغل طبقًا للقانون الثانى للديناميكا الحرارية . ونحن سكان الأرض نعلم أن هذا المقياس يمكن تعريفه حسب صيغة كارنو للقانون الثانى بالعلاقة $T_h/T_c = Q_h/Q_c$. علاوة على ذلك قرر العالم أن يكون الفرق بين نقطتى غليان وتجمد الماء على هذا المقياس 100 درجة . ومن قياساته على دورة كارنو عند نقطتى غليان وتجمد الماء عند الضغط الجوى لهذا الكوكب وجد العالم أن $Q_h/Q_c = 0.732$. ما قيمة كل من نقطتى الغليان والتجمد للماء على هذا المقياس لدرجة الحرارة ؟ هل يمكنك أن تستنتج أى شىء عن الضغط الجوى فى هذا الكوكب بالمقارنة بالضغط الجوى على الأرض ؟

■ 28 ـ تتسارع سيارة من السكون إلى سرعة قدرها 8.3 m/s خلال 6.6 s . (أ) ما هى أقل قدرة حصانية يجب أن يولدها المحرك إذا كانت جميع فواقد الاحتكاك مهملة ؟ (ب) بفرض أن السيارة تستهلك وقودها بكفاءة قدرها 22 فى المائة ، عين كمية الجازولين المستهلكة خلال فترة زمنية قدرها 6.6 s ، علمًا بأن الحرارة الناتجة عن احتراق جرام واحد من الجازولين 50,000 J .

■ 29 ـ لنفرض أن درجة الاحتراق فى توربين غازى (T_h) تساوى 2400°C وأن درجة حرارة العادم (T_e) تساوى 400°C ؛ واعتبر أن التوربين يعمل بثلث الكفاءة القصوى الممكنة . ولكى لا تضيع حرارة العادم هباء فإنها تستخدم فى إنتاج بخار درجة حرارته 400°C لتشغيل توربين بخارى ذى درجة حرارة منخفضة يعمل بكفاءة قدرها 70 فى المائة من كفاءته القصوى الممكنة ويصرف العادم عند درجة 70°C . هذا مثال لما يسمى محرك الدورة الموحدة . (أ) ما كفاءة كل محرك على حدة ؟ ما هى الكفاءة الكلية لتشغيل الدورة الموحدة ؟ (جـ) إذا كان كل من المحركين محرك كارنو مثالى ، فما هى أقصى كفاءة ممكنة للمجموعة ؟

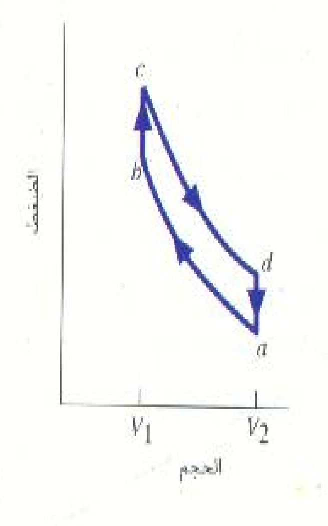
■ 30 ـ عمم المسألة 29 باعتبارات محركين حراريين مثاليين موصلين على التوالى ، يعمل أحدهما بين درجتى T_1 و T_2 ويعمل الثانى بين درجتى T_2 و T_3 . (افترض أن $T_1 > T_2 > T_3$) . إثبت أن كفاءة هذه المجموعة يمكن كتابتها على الصورة $1-(T_3/T_1)$.

■ 31 ـ افترض أن سعر الكهرباء 0.075$ /kWh وسعر الوقود البترولى 1.25$ /gal ، وأن الوقود البترولى يعطى عند احتراقه كمية قدرها 36,000 kcal من الحرارة لكل جالون . والآن لديك الاختيارات الآتية لتدفئة منزلك : (أ) تركيب حارق بترولى يولد الحرارة بكفاءة قدرها 75 فى المائة ، (ب) تركيب سخانات كهربائية تحول 100 فى المائة من الطاقة الكهربائية إلى حرارة ، (جـ) استخدام الكهرباء لتشغيل مضخة حرارية COP لها يساوى 4 . عين تكاليف الحصول على 100,000 kcal من الحرارة لتدفئة المنزل باستخدام كل من هذه الطرق .

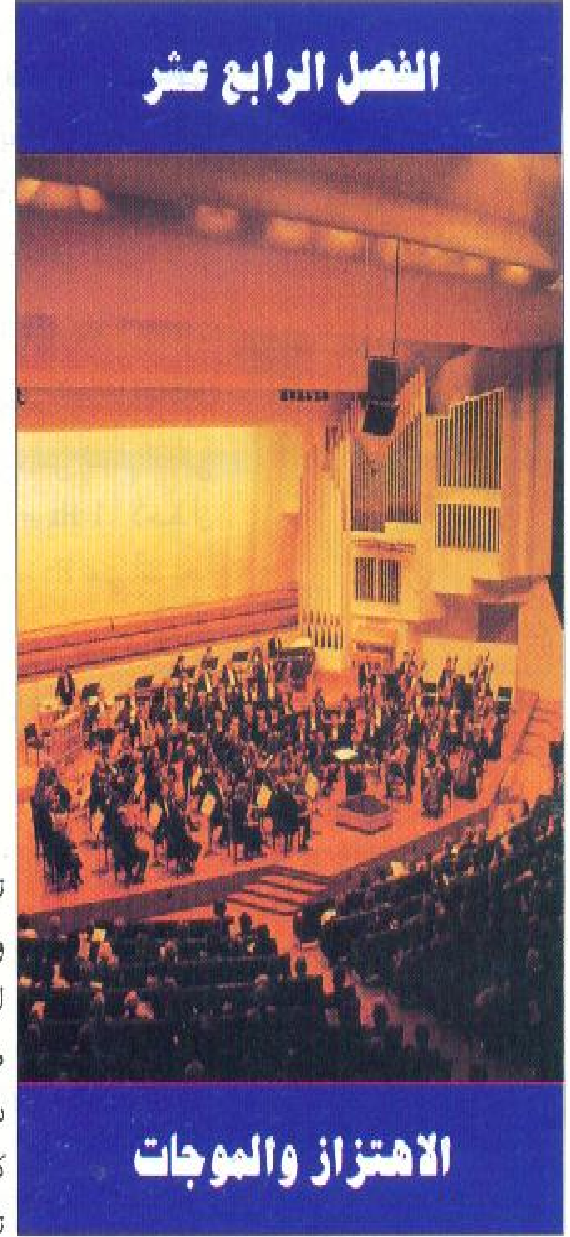
■■ 32 ـ يمكن تقريب الدورة الديناميكية الحرارية لمحركات الاحتراق الداخلى الحديثة إلى درجة معقولة باعتبارها مكونة من عمليتين أدياباتيتين وعمليتين أيسوكوريتين كما هو موضح بالشكل م 4-13 ، حيث ab و cd هما العمليتان الأدياباتيتان . وتعرف النسبة V_1/V_2 بنسبة انضغاط المحرك . وسنفترض أن خليط الهواء والوقود فى محرك من هذا النوع يسلك سلوك غاز مثالى النسبة بين حرارتيه النوعيتين $\gamma = 1.4$. استخدم تعريف الكفاءة بأنها النسبة W_{out}/Q_{in} فى تحليل هذه الدورة لإثبات أن كفاءتها يمكن كتابتها على الصورة :

$$\text{الكفاءة} = 1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

(ب) احسب كفاءة المحرك عندما $V_2 = 6\,V_1$ وعندما $V_2 = 20\,V_1$.



شكل م 4-13



الفصل الرابع عشر

الاهتزاز والموجات

تناولنا فى الفصول السابقة مناقشة الميكانيكا وخواص المادة ، وسوف نقوم فى الفصلين التاليين بتطبيق الكثير من هذه المفاهيم لدراسة الاهتزاز والحركة الموجية . **والموجة** مصطلح ينطبق على مدى واسع من الظواهر الناتجة عن الأجسام المهتزة فى حركة دورية . فأوتار الجيتار أو الأحبال الصوتية تولد موجات الصوت ، كما أن الشحنات الكهربائية المهتزة على هوائى جهاز الراديو تولد الموجات اللاسلكية .

يختص هذا الفصل بوصف الحركة الموجية عمومًا مع إعطاء بعض الأمثلة البسيطة للحركات الدورية التى تولد الموجات فى زنبرك أو وتر مشدود . وسنقوم فى الفصل الخامس عشر بدراسة الموجات الصوتية التى يكون الوسط المهتز فيها هو جزيئات الهواء وليس وترًا أو زنبركًا . هذا وسوف نتعرض فى فصول تالية للموجات الكهرومغناطيسية ، كموجات الراديو أو الموجات الضوئية . وكما لا يخفى فإن موضوع الموجات موضوع عظيم الأهمية فى حياتنا .

14-1 الحركة الدورية

تتحرك جميع الأنظمة المهتزة نفس الحركة مرات ومرات ، فالبندول الموضح بالشكل 14-1 ، مثلاً ، يهتز (أو يتذبذب) ذهابًا وإيابًا مرة بعد مرة بعد مرة . ويقال فى مثل هذا الموقف إن الحركة دورية ؛ وسوف نعرف دورة الحركة (أو الزمن الدورى للحركة) كالتالى :

دورة الاهتزاز T (الحرف اليونانى تاو) هى الزمن اللازم لعمل اهتزازة كاملة .

والدورة فى حالة البندول الموضح بالشكل 1-14 هى الزمن الذى يستغرقه البندول فى تأرجحه من A إلى C وعودته إلى A . لاحظ أن الدورة هى الزمن **الكلى** الذى تبتعد كرة البندول خلاله عن A أثناء اهتزازة كاملة . وتسمى الحركة التى يصنعها الجسم المهتز خلال دورة واحدة **بدورة الاهتزاز** .

كثيرًا ما نتحدث عن تردد الاهتزاز ، وهو يعرف كالتالى :

تردد الاهتزاز f هو عدد دورات الاهتزاز التى يكملها النظام المهتز فى وحدة الزمن .

ويعبر عن الترددات عادة بالدورات لكل ثانية (s^{-1}) فمثلاً ، قد يصنع وتر الجيتار 330 دورة اهتزاز فى 1 s ، وبذلك يكون تردده $330\ s^{-1}$. ووحدة التردد فى النظام SI هى الهرتز (Hz) ، وهى مجرد اسم آخر للدورات فى الثانية : $1\ Hz = 1\ s^{-1}$. لاحظ أن « الدورات » مصطلح ليس له أبعاد فيزيائية ، ولكن تذكر أن الوحدة Hz تعنى أنك تعد الدورات لكل ثانية .

هناك علاقة هامة بين التردد f والدورة τ . فحيث أن التردد هو عدد الاهتزازات لوحدة الزمن ، وحيث أن الاهتزازة الكاملة تستغرق زمنا قدره τ ، إذن :

$$f = \frac{\text{عدد الاهتزازت}}{\text{الزمن اللازم لها}} = \frac{\text{1 اهتزاز}}{\text{دورة}}$$

وعليه فإن العلاقة العامة هنا هى :

$$f = \frac{1}{\tau} \qquad (14\text{–}1)$$

هذه العلاقة تنطبق على جميع الحركات الدورية . فإذا كانت دورة حركة معينة هى 0.020 s ، مثلاً ، فإن ترددها سيكون 50 Hz .

وهناك أيضًا خاصية أخرى للحركة الدورية ، وهذه هى سعة الحركة .

السعة هى أقصى إزاحة عن موضع اتزان الجسم عندما لا يكون الجسم مهتزًا .

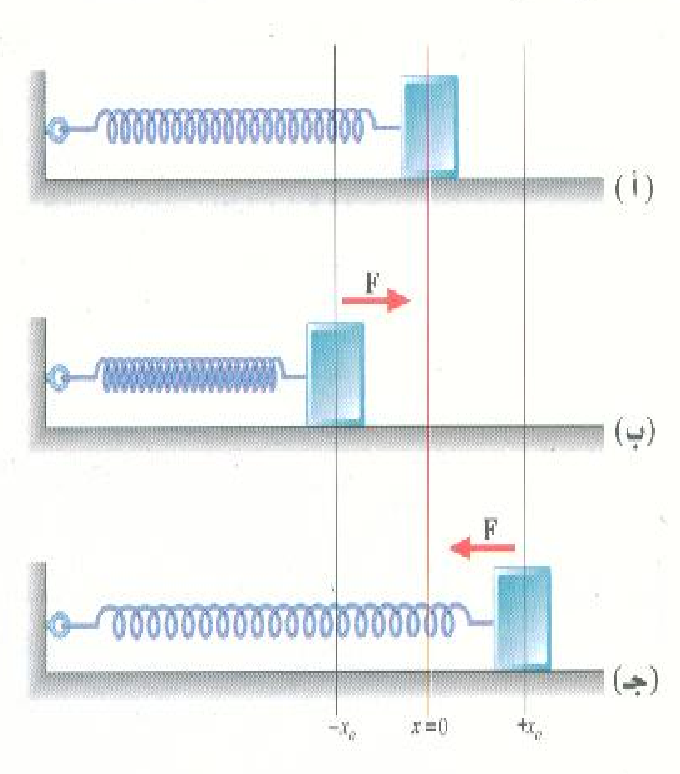
فالسعة فى حالة البندول الموضح بالشكل 1-14 هى المسافة AB أو BC . لاحظ أن السعة هى نصف المسافة الكلية التى يتأرجح النظام خلالها فقط .

تعتبر طريقة التحول المتبادل لطاقتى حركة ووضع النظام المهتز سمة هامة أخرى للحركة الدورية . فمثلاً ، عندما تصل كرة البندول المبين بالشكل 1-14 إلى النقطة A أو C فإنها تسكن لحظيًا ، وبذلك لن يكون لها طاقة حركة ، بل سيكون لها طاقة جهد تثاقلى فقط عند هاتين النقطتين . ومع ذلك ، فعندما تتأرجح الكرة تجاه النقطة B فإنها تفقد طاقة الوضع ، وتكتسب كمية مساوية من طاقة الحركة . وعليه فإن طاقة الكرة تظل ثابتة أثناء تأرجحها ذهابًا وإيابًا ، ولكنها تتغير باستمرار من طاقة حركة إلى طاقة وضع ، وبالعكس أثناء التأرجح .

ويمثل الشكل 2-14 نظامًا مهتزًا نموذجيًا آخر . ويتكون هذا النظام من كتلة مثبتة

شكل 1-14:
بندول يتحرك حركة دورية . يصنع البندول نصف دورة اهتزاز واحدة عندما تتحرك الكرة من أقصى موضع على الجانب الأيسر إلى أقصى موضع على الجانب الأيمن .

فى طرف زنبرك ، وسوف نفرض أن الكتلة يمكنها أن تنزلق على السطح الأفقى ذهابًا وإيابًا بدون احتكاك . ويمثل الجـزء (أ) نظام الكتلة والزنـبرك فـى حالـة الاتـزان ، حيث تكون القوة الأفقية المؤثرة على الكتلة صفرًا وهى فى هذا الموضـع . (يتعـادل شـد الجاذبية إلى أسفل مع دفع المنضدة إلى أعلى ، وبذلك يكون صافى القـوة الرأسـية المؤثـر على الكتلة صفرًا دائمًا) .



شكل 2-14:

(أ) الموضع $x = 0$ يمثل موضـــع اتزان الكتلة قبل بدأ حركة النظـــام ، وعند وجود الكتلة فى هذا الموضع لا يؤثر عليها الزنبرك بأى قوى .

(ب) للزنبرك المضغوط طاقة جـــهد مختزنة فيه ، ولذلك فهو يؤثر بقوة الاستعادة على الكتلة الساكنة لحظيًا .

(جـ) الزنبرك الممتد له أيضًا نفـــس القدر من طاقة الجهد المختزنة كمـــا فى (ب) . ولذلك فهو يؤثر بنفـــس قوة الاستعادة على الكتلـــة الســـاكنة لحظيًا .

لنفرض أننا ضغطنا الزنبرك بتحريك الكتلة إلى الموضع $-x_0$ المبين بالشكل 2-14 ب . وهذا يعنى أننا نبذل شغلاً على الزنبرك أثناء هذه العملية ، وأننا بذلك نختزن فيه كمية معينة من طاقة الجهد . ونتيجة لذلك فإن الزنبرك سوف يؤثر على الكتلـة بقوة معينـة تميل إلى دفع الكتلة مرة أخـرى إلى الموضـع $x = 0$. فـإذا أعتقت الكتلـة الآن بحيـث يمكنها الحركة بحرية تحت تأثير القوة المسلطة بواسطة الزنبرك ، فإن الزنـبرك سـوف يسبب تسارع الكرة إلى اليمين حتى تصل إلى الموضع $x = 0$. ولكن ما أن تصل الكرة إلى الموضع $x = 0$ فإنها تكون قد اكتسبت سرعة عالية ، ويكون الزنبرك قد فقـد كـل طاقـة الجهد المختزنة فيـه أثنـاء انضغاطه . من الواضـح إذن أن طاقـة الجـهد المختزنـة فـى الزنبرك تظهر الآن على هيئة طاقة حركة للكتلة المتحركة .

ومع ذلك فلن تتوقف الكتلة عند $x = 0$ لأن لـها طاقـة حركـة يجـب أن تفقدهـا أولاً ببذل الشغل قبل أن تتوقف . وهكذا فإنها تستمر فى الحركة على الجـانب الأيمـن مـن $x = 0$ ، فتسبب بذلك امتداد الزنبرك واختزان الطاقة فيه . وبوصول الكتلـة إلى الموضـع $+x_0$ المبين بالشكل 2-14 جـ تكـون قد فقدت كـل طاقـة حركتـها ببـذل الشغـل ضد الزنبرك ، وبهذا الشكل تتحول طاقة حركة الكتلة إلى طاقة جهد فـى الزنـبرك الممتـد . وبناء على ذلك تصبح سرعة الكتلة صفرًا لحظيًا عند $x = x_0$.

ونظرا لأن الزنبرك قد أصبح ممتدًا فإنه يبدأ فى تعجيل الكتلة إلى اليسار . وعند وصول الكتلة إلى النقطة $x = 0$ تتحول الطاقة كلها إلى طاقة حركة ، فتستمر فى الحركة يسارًا إلى أن ينضغط الزنبرك تدريجيًا حتى تصل الكرة مرة أخرى لى $x = -x_0$ ؛ وفى هذا الوضع تكون طاقة الحركة قد تحولت إلى طاقة جهد مختزنة فى الزنبرك المنضغط . وهكذا ، فإن الحركة سوف تكرر نفسها إلى الأبد مع اهتزاز الكرة ذهابًا وإيابًا بين $x = +x_0$ و $x = -x_0$ طالما لا توجد أى فواقد احتكاكية للطاقة . لاحظ أنه عندما تتذبذب الكرة بالطريقة السابق وصفها فإن الطاقة تتذبذب أيضًا ذهابًا وإيابًا بين طاقة الحركة وطاقة الوضع ، ولكن الطاقة الكلية تظل ثابتة ؛ فالطاقة محفوظة .

ويحدث موقف مشابه لذلك عند تعليق كتلة فى طرف زنبرك رأسى معلق من طرفه الآخر . فى هذه الحالة سوف يستطيل الزنبرك تحت تأثير وزن الكتلة المعلقة ويصل النظام إلى حالة الاتزان عندما تتعادل القوة المتولدة فى الزنبرك إلى أعلى مع الوزن إلى أسفل . وإذا أزيحت الكتلة مسافة صغيرة إلى أسفل ثم تحركت حرة فإنها سوف تهتز ذهابًا وإيابًا حول موضع الاتزان فى حركة تذبذبية رأسية . ومن الجدير بالذكر أن هذه الحركة التذبذبية الرأسية للكتلة المعلقة فى الزنبرك مماثلة تمامًا للحركة الأفقية السابق مناقشتها ؛ ولكننا لن نقوم بإثبات ذلك هنا .

يمثل البندول ونظام الكتلة والزنبرك مثالان فقط من أمثلة الأنظمة المهتزة ، وهذه الأنظمة جميعها تتميز بالتحول المتبادل لطاقة النظام المهتز بين طاقة الحركة وطاقة الوضع . وحيث أن كثيرًا من الأنظمة المهتزة الهامة تتضمن زنبركات من نوع أو آخر ، لنخصص الآن بعض الوقت لإيجاد الطاقة المختزنة فى زنبرك .

14-2 قانون هوك وطاقة الجهد المرن

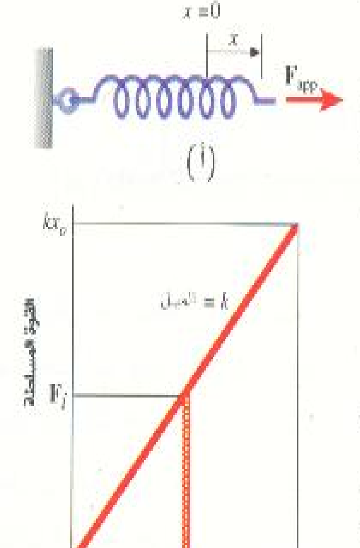
رأينا فى الفصل التاسع أن كثيرًا من الأنظمة المرنة (الشبيهة بالزنبركات) تتبع قانون هوك الذى ينص على أن القوة المشوهة تتناسب مع التشوه الذى تسببه . وفى حالة زنبرك يستطيل تحت تأثير قوة مسلطة F_{app} كما بالشكل 3-14 أ فإن الإزاحة $\mathbf{x}$ التى يستطيل بها الزنبرك ترتبط بالقوة F_{app} تبعًا للعلاقة :

$$\mathbf{F}_{app} = k\mathbf{x} \qquad (14-2)$$

حيث k مقدار ثابت يسمى **ثابت الزنبرك** ، ووحداته فى النظام SI هى النيوتن لكل متر . وثابت الزنبرك مقياس « لكزازة » الزنبرك ، فكلما زادت قيمة ثابت الزنبرك ، كلما زادت القوة اللازمة لإطالة الزنبرك بمقدار محدد .

ويوضح الشكل 3-14 ب كيف تتغير القوة مع تشوه الزنبرك الموضح بالشكل 3-14 أ . هذا المنحنى عبارة عن خط مستقيم ميله يساوى k طبقًا للمعادلة (2-14) (قانون هوك) . لنحاول الآن حساب الطاقة المختزنة فى زنبرك ممتد أو منضغط يتبع قانون هوك .

يمكننا إثبات أن الشغل المبذول لإطالة الزنبرك من $x = 0$ إلى $x = x_0$ يساوى المساحة

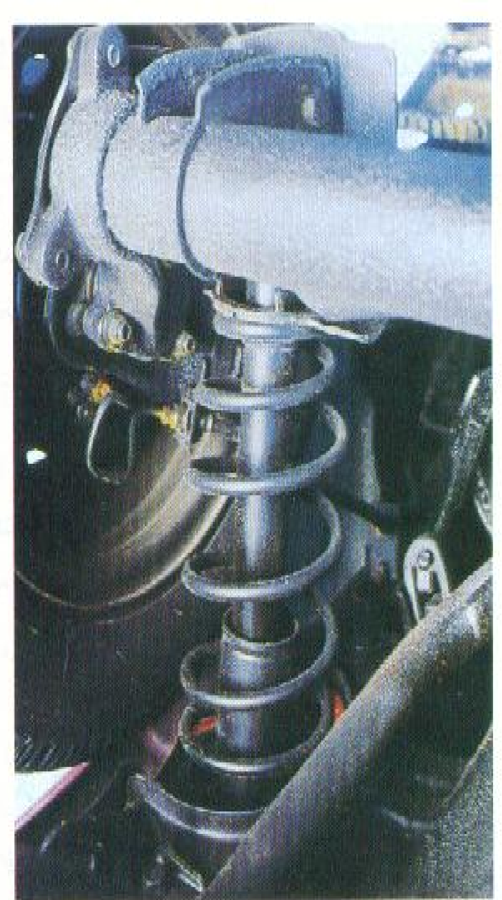


شكل 3-14:
لكى يستطيل الزنبرك بمقدار معين يجب أن تسلط عليه قوة خارجية مساوية ومضادة لقوة الاستعادة المؤثرة بواسطة الزنبرك . ونظرًا لأن قوة الاستعادة تتناسب مع مقدار الاستطالة x ، فإن $\mathbf{F}_{app} \sim x$ ، وهذا مبين بالجزء (ب) ، والشغل المبذول بواسطة $\mathbf{F}_{app}$ يساوى المساحة الواقعة تحت منحنى $\mathbf{F}_{app}$ مقابل x .

تحت الخط المستقيم المبين بالشكل 3-14 ب . ولتحقيق ذلك يمكننا ملاحظة أن مساحة المستطيل المظلل بالشكل تساوى $F_i \Delta x_i$ ، حيث F_i هى قوة المطيلة أثناء الزيـادة الصغيرة فى التشوه Δx_i . وحيث أن $W = F_s \Delta s$ ، إذن هذه المساحة تساوى أيضًا الشغل المبـذول بواسطة قوة المطيلة أثناء هـذه الزيـادة الصغيرة فى الإزاحـة . فإذا تخيلنا أن المنطقة الموجودة تحت الخط المستقيم من $x = 0$ إلى $x = x_0$ مملوءة بعدد كبير جدًا من مثل هذه المستطيلات ، فإن مجموع مساحات هذه المستطيلات يعطينا الشغل المبـذول أثنـاء إطالـة الزنبرك من $x = 0$ إلى $x = x_0$. إذن :

الشغـل المبذول فى إطالة أو ضغط عنصر مرن يساوى المساحة المحصورة تحت الخط البيانى الذى يمثل F مقابل x .

وهذا شبيه بحساباتنا السابقة (القسم 3-12) عند استخدام الرسم البيـانى PV لتعيين الشغل المبذول بواسطة غاز عندما يتغير حجمه ، وعليك إثبات أن ذلك صحيح أيضًا فى حالة انضغاط الزنبرك .



تتولد فى « اليايات الملتفة » للسيارة قـوى تتناسب مع مقدار استطالتها أو انضغاطها . وتقـوم ممتصـات الصدمـات الموجـودة بمنتصفها بتخميد الاهتزازات الناتجـة عنـد مرور السيارة على مطبات الطريق .

وحيث أن مساحة المثلث تساوى نصف حاصل ضرب طـول قاعدتـه فـى ارتفاعـه ؛ إذن يمكننا أن نرى من الشكل 3-14 أن المساحة الواقعة تحـت الخـط البيانـى تسـاوى $(\frac{1}{2}x_0)(kx_0)$. ولكن هذه المساحة تساوى الشغل المبذول فى إطالة الزنبرك ؛ ولذلك فـهى تساوى طاقة الجهد المختزنة فـى الزنـبرك . بنـاء علـى ذلك يستنتج أن طاقـة الجـهد المختزنة فى زنبرك ثابتة k عند استطالته أو انضغاطه مسافة قدرها x تساوى :

$$\text{طاقة الجهد المرن} = \text{EPE} = \frac{1}{2}kx^2 \qquad (14\text{–}3)$$

والآن وقد تمكنا من إيجاد الطاقة المرنة المختزنة في زنبرك (أو أي نظام يتبع قانون هوك) ، يمكننا استخدام قانون بقاء الطاقة لكي نعلم الكثير عن اهتزاز النظام الموضح بالشكل 2–14 . لقد فرضنا في تلك الحالة أن فواقد الاحتكاك مهملة ، وهذا يعني طبقا لقانون بقاء الطاقة أن مجموع طاقة الجهد المختزنة في الزنبرك وطاقة حركة الكتلة يجب أن يظل ثابتًا . وللتعبير عن هذا المعنى في صورة معادلة رياضية لنعد مرة أخرى إلى النظام المبين بالشكل 2–14 لحظة إعتاق الكتلة من الموضع $x = x_0$. والآن ، حيث أن الطاقة الكلية الابتدائية للنظام في تلك الخطة تساوي $\frac{1}{2}kx_0^2$ ، فإن طاقته الكلية في أي لحظة زمنية تالية تكون :

$$\text{EPE} + \text{KE} = \frac{1}{2}kx_0^2$$

وبالتعويض نجد أن :

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2 \qquad (14\text{–}4)$$

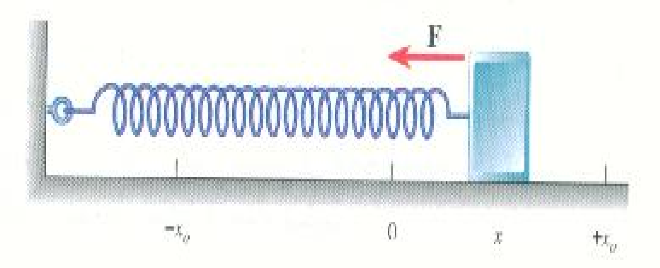
حيث m و v تعود على الكتلة المثبتة في الزنبرك فقط ، لأننا نفترض أن كتلة الزنبرك نفسه مهملة . لاحظ أن x_0 تمثل هنا سعة الحركة .

والمعادلة 4–14 ، رغم بساطتها ، أداة فعالة جدًا في مناقشة الحركة الاهتزازية ، ويمكن استخدامها لإيجاد سرعة الكتلة عند أي نقطة x في مسار الحركة :

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(x_0^2 - x^2)}$$

لا تحفظ هذه المعادلة لأنها هي نفس المعادلة 4–14 بعد إعادة ترتيب حدودها . لاحظ أن $v = 0$ عند $x = x_0$ ؛ أي عندما تكون الكتلة في نهاية الاهتزازة ، وأن السرعة تصل إلى أكبر قيمة لها ، $x_0\sqrt{k/m}$ ، عند $x = 0$. ومع أننا نعلم هذه الحقائق من مناقشتنا الوصفية للتحول المتبادل للطاقة بين طاقتي الحركة والوضع ، فإننا نستطيع الآن إيجاد سرعة الكتلة المهتزة عند أي موضع x .

يتبقى علينا الآن إيجاد عجلة الكتلة المهتزة . عندما يهتز النظام اهتزازًا حرًا يكون الموقف كما هو مبين بالشكل 4–14 . وكما نرى من الشكل فإن القوة الوحيدة غير المتزنة المؤثرة على الكتلة هي شد الزنبرك لها F ، وهذه القوة تسمى قوة الاستعادة لأنها تؤثر دائما في اتجاه يعمل على جذب أو دفع النظام إلى موضع اتزانه . ومع أن مقدار F



شكل 4–14:
القوة التي يؤثر بها الزنبرك على الكتلة هي قوة استعادة تعطى بالعلاقة $F = -kx$.

يساوي kx ، أي نفس القوة اللازمة لإطالة الزنبرك بمقدار x ، إلا أن اتجاهها مضاد لاتجاه الاستطالة . وبذلك تكون قيمتها $\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$ ، حيث تشير الإشارة السالبة إلى أن هذه قوة استعادة ، أي قوة تؤثر في اتجاه مضاد للإزاحة $\mathbf{x}$. وحيث أن $\mathbf{F}$ هي القوة غير المتزنة المؤثرة على الكتلة ، يمكننا أن نجد من العلاقة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. أن عجلة الكتلة تعطى بالمعادلة :

$$\mathbf{a} = -\frac{k}{m}\mathbf{x} \qquad (14\text{-}5)$$

لاحظ أن مقدار العجلة يصل إلى قيمته العظمى عند $x = \pm x_0$ لأن قوة الاستعادة تكون أكبر ما يمكن في هذين الموضعين ، أما عند $x = 0$ فإن قوة الاستعادة تكون صفرًا ، وتكون العجلة بالتالي صفرًا . وهكذا نرى أنه يمكننا استعمال المعادلتين 4-14 و 5-14 لإيجاد سرعة وعجلة الكتلة عند أي إزاحة x .

مثال 1-14 :

علقت كرة قدرها 500 g في زنبرك رأسي معين فسببت استطالته بمقدار 20 cm . لنفرض أننا استبدلنا هذه الكتلة بأخرى مقدارها 2.00 kg لتكوين نظام مهتز أفقي كالمبين بالشكل 4-14 . أزيحت هذه الكتلة الآن مسافة قدرها 40.0 cm عن موضع اتزانها ثم تركت حرة . أوجد (أ) السرعة القصوى للكتلة ، (ب) عجلتها القصوى ، (جـ) سرعة الكتلة وعجلتها عند $x = 10.0$ cm

أ

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو الشرط اللازم تحققه عند السرعة القصوى ؟

الإجابة : تكون السرعة في قيمتها القصوى عندما تكون الطاقة الكلية للنظام طاقة حركة ، وهذا يحدث عندما لا يكون الزنبرك ممتدًا أو منضغطًا ، أي عند $x = 0$.

سؤال : ما هو القانون الفيزيائي الذي يربط السرعة بالموضع ؟

الإجابة : قانون بقاء الطاقة :

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$$

إذن : عند $x = 0$:

$$v = v_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m}}x_0$$

سؤال : قيمة k مجهولة . ما هي الكميات اللازم معرفتها لكي يمكن حساب k ؟

الإجابة : ثابت الزنبرك k يساوي النسبة بين القوة المسلطة والاستطالة الناتجة في الزنبرك ، وكل هذه البيانات المطلوبة معطاة في نص المسألة .

سؤال : بالنسبة إلى الجزء (ب) ، ما هو الشرط اللازم تحققه عند العجلة القصوى ؟

الإجابة : تصل العجلة إلى أقصى قيمة لها عندما يكون صافى القوة فى نهايته العظمى . وهذا يحدث عند نقطتى أقصى استطالة وأقصى انضغاط ، أى عند $x = +x_0$. هذا أيضًا هو الشرط الذى يتحقق عندما تكون طاقة الحركة صفرًا ، أو $v = 0$.

سؤال : بالنسبة للجزء (جـ) ، ما هو المبدأ الأساسى الذى يربط السرعة بأى موضع وسطى يقع بين $x = 0$ ، $x = \pm x_0$ ؟

الإجابة : هذا المبدأ ، مرة ثانية ، هو قانون بقاء الطاقة (المعادلة 4–14) . وحيث أن الطاقة الكلية عند أى موضع وسطى تساوى مجموع طاقتى الحركة والجهد ، إذن يمكننا كتابة :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(x_0^2 - x^2)$$

سؤال : ما هى العلاقة بين العجلة والموضع ؟

الإجابة : تعتمد القوة التى يؤثر بها الزنبرك على الموضع طبقًا للعلاقة $\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$. وحيث أن هذه هى صافى القوة المؤثرة على m فإنها وحدها هى المسئولة عن العجلة طبقًا للعلاقة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

الحل والمناقشة : يمكننا حل المعادلة (2–14) بالنسبة إلى k أولاً ، حيث $\mathbf{F}_{app}$ هى وزن الكتلة 500 g :

$$k = \frac{(0.500\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)}{0.200\ \text{m}} = 24.5\ \text{N/m}$$

(أ) وهكذا يمكن حساب مقدار السرعة القصوى مباشرة :

$$v_{max} = x_0\sqrt{\frac{k}{m}} = 0.400\ \text{m}\sqrt{\frac{24.5\ \text{N/m}}{2.00\ \text{kg}}} = 1.40\ \text{m/s}$$

عليك أن تتحقق من صحة الوحدات .

(ب) العجلة القصوى تساوى :

$$a_{max} = \frac{kx_0}{m} = \frac{(24.5\ \text{N/m})(0.400\ \text{m})}{2.00\ \text{kg}} = 4.90\ \text{m/s}^2$$

(جـ) والعجلة عند $\mathbf{x} = +10.0$ cm هى :

$$\mathbf{a} = -\frac{k\mathbf{x}}{m} = -\frac{(24.5\ \text{N/m})(0.100\ \text{m})}{2.00\ \text{kg}} = -1.22\ \text{m/s}^2$$

لاحظ أن اتجاه $\mathbf{a}$ مضاد لاتجاه الإزاحة $\mathbf{x}$. تذكر أيضًا أن k خاصية مميزة للزنبرك ، وأن قيمته ثابتة للزنبرك الواحد ، ويمكن إيجاد k بقياس النسبة F/x طالما كان الزنبرك يتبع قانون هوك .

وأخيرًا ، نحسب السرعة عند $x = 10.0$ cm كما يأتى :

$$\mathbf{v} = \pm\sqrt{\frac{k(x_0^2 - x^2)}{m}}$$

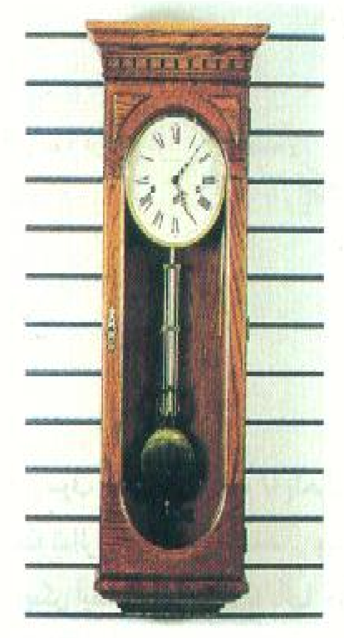
$$= \pm\sqrt{\frac{(24.5\ \text{N/m})[(0.400\ \text{m})^2 - (0.100\ \text{m})^2]}{2.00\ \text{kg}}}$$

$$= \pm\ 1.36\ \text{m/s}$$

ويلاحظ أن الإشارتين ضروريتان هنا لأن الكتلة قد تكون متحركة تجاه النقطة x_0 أو مبتعدة عنها عند $x = 10.0$ cm .

تمرين : أوجد **v** و **a** عند $x = -5.00$ cm . **الإجابة** : ± 1.39 m/s ، $0.613\ \text{m/s}^2$.

14-3 الحركة التوافقية البسيطة



يتحرك بندول ساعة الحائط حركة توافقية بسيطة . وحيث أن دورة البندول ثابتة فإن الساعة يمكنها قياس الوقت قياسًا صحيحًا .

هناك أنواع كثيرة من الحركة الدورية ، وما حركة الكتلة المعلقة في زنبرك إلا أحد أنواع هذه الحركة . ومع أن وصف حركة الكتلة المعلقة في زنبرك بسيط بشكل خاص ، إلا أن هناك أمثلة أخرى كثيرة ، كالبندولات مثلاً ، ينطبق عليها نفس هذا الوصف للحركة الدورية . والسمة الأساسية لهذه الأنظمة الدورية البسيطة هي أنه إذا أزيح النظام عن موضع الاتزان فإن **قوة الاستعادة الناشئة تتناسب خطيًا** مع مقدار الإزاحة .

وقد رأينا أن قانون هوك (المعادلة 2-14) الذي يحكم الحركة في حالة نظام الكتلة والزنبرك يكتب على الصورة :

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$$

حيث k ثابت الزنبرك .

وبتعميم هذا التعبير نحصل على الصورة الأساسية لقانون القوة :

(14-6) قوة الاستعادة = - (ثابت) (الإزاحة عن موضع الاتزان)

وعندما تكون قوة الاستعادة هي القوة المؤثرة الوحيدة سنجد أن عجلة الكتلة المهتزة تأخذ الصورة :

(14-7) $$\mathbf{a} = \frac{-\ (\text{ثابت})\ (\text{الإزاحة})}{\text{الكتلة}}$$

وتسمى حركة أي نظام تحت تأثير القوة المعطاة بالمعادلة (6-14) بالحركة التوافقية البسيطة (SHM) .

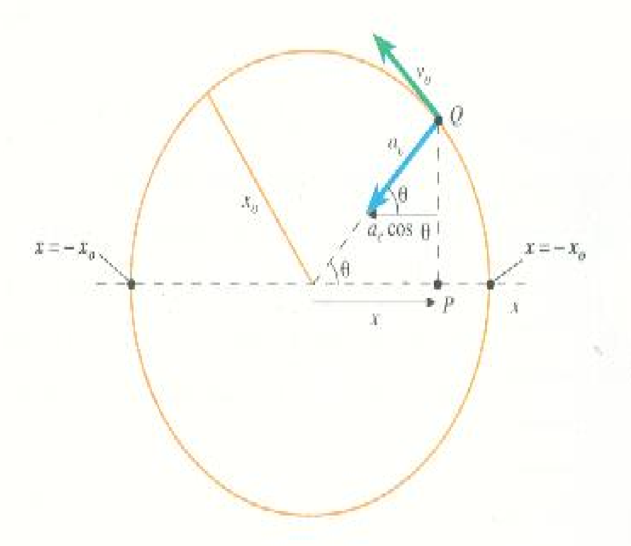
الحركة التوافقية البسيطة هي الحركة الناشئة نتيجة لاستجابة النظام لقوة استعادة تتناسب خطيًا مع مقدار إزاحة النظام عن موضع الاتزان .

وبتحليل قوة الاستعادة في أي موقف معين يمكننا إيجاد ثابت التناسب في المعادلتين (6-14) و (7-14) ، والذي يسمى **ثابت القوة** للنظام المعنى . وهكذا فإن ثابت القوة يلعب في هذه الحركة نفس الدور الذي يلعبه ثابت الزنبرك k في حركة النظام المكون من الكتلة والزنبرك تمامًا . وإذا ما تمكنا من إثبات أن قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع إزاحة النظام عن موضع الاتزان ، وفي عكس اتجاهه لن يكون من الضروري اشتقاق معادلات

الحركة السابقة مرة أخرى ، بل يمكننا تطبيقها مباشرة . وقبل الانتقال إلى أمثلة أخرى للحركة التوافقية البسيط لنناقش اعتماد هذه الحركة على الزمن أولاً ونشتق تعبيرًا لترددها .

14-4 تردد الحركة التوافقية البسيطة

يعتبر إيجاد تعبير لتردد الحركة التوافقية البسيطة باستعمال حساب التفاضل والتكامل مسألة مباشر تمامًا ، ولكننا سنستخدم الطريقة البيانية هنا لأن الإلمام بحساب التفاضل والتكامل ليس من متطلبات هذا المقرر .



شكل 5-14:
عندما يتحرك الجسيم Q على محيط دائرة نصف قطرها x_0 بسرعة ثابتة المقدار v_0 ، تتحرك النقطة P حركة توافقية بسيطة من $-x_0 \le x \le x_0$ ، ونظرا لأن نصف قطر الدائرة x_0 ، إذن $x = x_0 \cos\theta$.

سوف نبدأ بتخيل جسيم Q يتحرك بسرعة ثابتة v_0 المقدار في دائرة نصف قطرها x_0 . هذه الدائرة تسمى **دائرة الإسناد** ، ويمثل الشكل 5-14 رسمًا تخطيطيًا لهذه الحركة . ويمكن أيضًا وصف حركة Q بأنها حركة ذات سرعة زاوية $\omega = \Delta\theta / \Delta t$ ثابتة تعطى بالعلاقة $\omega = v_0 / x_0$ (المعادلة 7-7) . تذكر من القسم 2-7 أن ω تقاس بالزاوية نصف القطرية لكل ثانية . ولكن الدورة T التى يصنع خلالها الجسيم Q دورة كاملة هى الزمن اللازم للدوران حول الدائرة مرة واحدة ، أو :

$$T = \frac{2\pi x_0}{v_0} = 2\pi\left(\frac{x_0}{v_0}\right)$$

إذن ، تردد الحركة f ، أى عدد الدورات لكل ثانية ، هو مجرد مقلوب الدورة :

$$f = \frac{1}{T}$$

لاحظ فى الشكل 5-14 أن النقطة P تمثل موضع مسقط الجسيم Q على المحور x ، حيث $x = x_0 \cos\theta$ لأى قيمة للإحداثى x . ومعنى ذلك أنه **عندما يدور الجسيم Q على محيط الدائرة دورة كاملة فإن P تتحرك على استقامة المحور x من $+x_0$ إلى $-x$ ثم تعود إلى $+x_0$ بنفس الدورة وبنفس التردد كالجسيم Q تمامًا وسوف نثبت الآن أن P تتحرك SHM .**

طبقًا للمعادلة (7-9) ، تعطى العجلة الطاردة المركزية للحركة الدائرة للجسيم Q بالعلاقة :

$$a_c = \frac{v_0^2}{x_0} = \omega^2 x_0$$

لاحظ أن هذه العجلة a_c تعمل في اتجاه نصف القطر إلى داخل ، كما هو مبين بالشكل 5-14 وبناء على ذلك فإن العجلة المناظرة للنقطة P تساوى مركبة a_c في اتجاه المحور x :

$$\mathbf{a}(P) = -a_c \cos\theta$$

وتعني الإشارة السالبة أن عجلة النقطة P ؛ أى $\mathbf{a}(P)$ ، تؤثر في الاتجاه السالب للمحور x . إذن ، باستخدام التعبير الخاص بالعجلة الطاردة المركزية a_c والعلاقة $x/x_0 = \cos\theta$ نحصل على :

$$\mathbf{a}(P) = -\omega^2 x \qquad (14\text{-}8)$$

حيث ω ثابتة . هذا يثبت أن النقطة P تتحرك SHM ، وذلك لأن العلاقة $\mathbf{a} = -k\mathbf{x}$ تمثل الصورة العامة لعجلة الحركة التوافقية البسيطة .

الآن أصبح إيجاد تردد الحركة التوافقية البسيطة عمومًا مسألة في غاية البساطة ، فباستعمال المعادلتين (7-14) و (8-14) نجد أن :

$$\mathbf{a} = -\omega^2 \mathbf{x} = -\left(\frac{k}{m}\right)\mathbf{x}$$

حيث k ثابت القوة في المعادلة (7-14) . وهكذا يمكن تعريف ω كالتالى :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (14\text{-}9)$$

إذن ، تردد الحركة التوافقية البسيطة للنقطة P هو :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (14\text{-}10)$$

كما أن دورة الحركة التوافقية البسيطة هو :

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (14\text{-}11)$$

وحيث أن هذا الاشتقاق لا يختص بمثال محدد للحركة التوافقية البسيطة ، يمكننا إذن استنتاج أن المعادلتين (10-14) و (11-14) هما التعبيران العامان لتردد ودورة أى نظام يتحرك SHM . وعليه ، **إذا أمكننا إيجاد ثابت القوة k لنظام معين ، يمكننا إيجاد f و T لهذا النظام مباشرة .**

مثال توضيحى 1-14

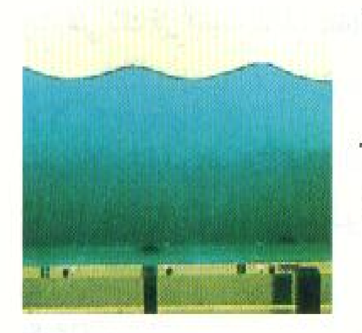
أوجد تردد اهتزاز النظام السابق مناقشته في المثال 1-14 .

استدلال منطقى : فى ذلك المثال كان ثابت الزنبرك $24.5\ N/m$ وكانت الكتلة المثبتة فى طرف الزنبرك $2.00\ kg$. إذن ، باستعمال المعادلة (10–14) نجد أن :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{24.5\ N/m}{2.00\ kg}} = 0.557\ s^{-1} = 0.557\ Hz$$



5–14 الحركة الجيبية

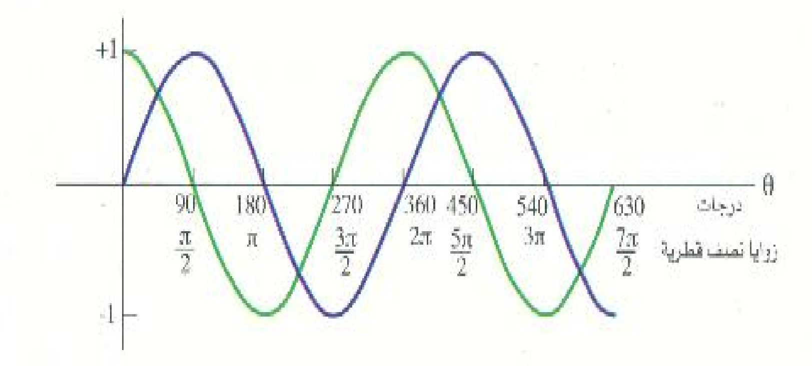


تبين هذه الصورة الفوتوغرافية للمقطع المستعرض لموجة على سطح الماء الشكل الجيبى لهذه الموجة .

من الممكن كتابة معادلة رياضية بسيطة لأى جسم يهتز فى حركة توافقية بسيطة فالإحداثى x للنقطة P فى الشكل 5–14 يعطى بالعلاقة :

$$x = x_0 \cos\theta$$

أى أن x تتناسب طرديًا مع $\cos\theta$ ، لأن x_0 ثابتة . لننظر الآن إلى منحنى كل من الدالتين $\sin\theta$ و $\cos\theta$ كما هما موضحان بالشكل 6–14 . هذا الشكل يبين أن كلتى الدالتين تتغيران دوريًا من -1 إلى $+1$ بدورة قدرها $360°$ ، أو 2π زاوية نصف قطرية . ويتغير $\cos\theta$ بين هذين الحدين تتغير x من $+x_0$ إلى $-x_0$ ، وهما يمثلان سعة حركتنا التوافقية البسيطة . وهنا تسمى الزاوية θ **طور** $\cos\theta$ و $\sin\theta$. لاحظ أن المنحنيين متماثلان من جميع



شكل 6–14: منحنى الدالة $\sin\ \theta$ مقابل θ (الخط الأزرق) والدالة $\cos\ \theta$ مقابل θ الزمن (الخط الأخضر) .

الوجوه باستثناء أن الدالة $\sin\theta$ مختلفة عن $\cos\theta$ بمقدار ربع دورة ، ويقال عندئذ أن دالة جيب الزاوية **متفاوتة الطور** مع دالة **جيب تمام الزاوية** بمقدار ربع دورة ، أو $90°$.

فى وصف الحركة التوافقية البسيطة بالقسم السابق كانت الزاوية θ تتغير مع الزمن بمعدل ثابت قدره ω ، حيث $\theta = \omega t$ ، وهذا يمكننا من وصف موضع النقطة P فى أى لحظة زمنية بالعلاقة :

$$x = x_0 \cos(\omega t) = x_0 \cos(2\pi f t) = x_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \qquad (14\text{–}12)$$

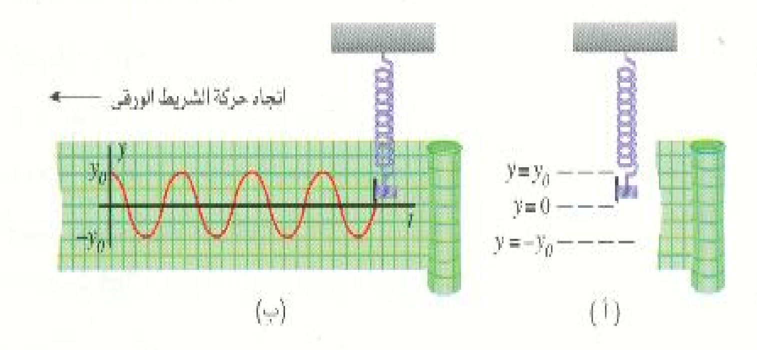
لاحظ أن هذه التعبيرات الثلاثة متكافئة ، ومن الحيوى أن تتذكر أن الكمية بين القوسين فى هذه التعبيرات الثلاثة مقدرة بالزوايا نصف القطرية .

تعرف الحركة التى يمكن وصفها كدالة فى الزمن على هيئة جيب تمام الزاوية (أو

جيب الزاوية) **بالحركة الجيبية** ، أى أن الحركة الجيبية أو الحركة التوافقية البسيطة شيء واحد . ولتخيل الطبيعة الجيبية للحركة التوافقية البسيطة يمكننا الاستعانة بالتجربة التوضيحية المبينة بالشكل 7-14 . والجهاز المستخدم هنا يتكون من جسم معلق فى زنبرك رأسى ، وهذا الجسم يحمل قلمًا يتلامس سنه مع شريط ورقى يتحرك إلى اليسار بسرعة ثابتة . فإذا رفع الجسم إلى أعلى مسافة قدرها y_0 ثم ترك حرًا ، فإنه سوف يتحرك حركة توافقية بسيطة سعتها y_0 ، وعندئذ سوف يرسم القلم على الورقة منحنى يمثل موضع الجسم أثناء اهتزازه إلى أعلى وإلى أسفل .

لنبدأ قياس الزمن ، $t = 0$ ، من لحظة تحرير الجسم ، وهذه النقطة هى الطرف الأيسر للمنحنى بالجزء (ب) من الشكل . أما موضع الجسم فى اللحظة المبينة بالشكل فيحدث بعد مرور زمن معين . ومن ثم يمكن اعتبار هذا المنحنى بمثابة رسم بيانى لإزاحة الجسم y كدالة فى الزمن . وطبقًا للمعادلة (12-14) فإن معادلة هذا المنحنى هى :

$$y = y_0 \cos(2\pi ft) = y_0 \cos(\omega t) = y_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$



شكل 7-14:
ترسم الكتلة المهتزة منحنى جيب تمام الزاوية كدالة فى الزمن .

وحيث أن* $a(t) = -(k/m)x(t)$ فى حالة الحركة التوافقية البسيطة ، فإن اعتماد a على الزمن يوصف أيضًا بنفس الدالة الجيبية ، ولكن بإشارة السالبة :

$$a = -a_{max}\cos(2\pi ft) \quad \text{حيث} \quad a_{max} = \left(\frac{k}{m}\right)x_0 = 4\pi^2 f^2 x_0 \qquad (14\text{–}13)$$

ونظرًا لأن الدالة $-\cos(2\pi ft)$ متأخرة عن $+\cos(2\pi ft)$ بمقدار نصف دورة ، يقال أن العجلة **متفاوتة الطور** مع x بمقدار نصف دورة أو $180°$.

لندرس أخيرًا كيفية تغير السرعة مع الزمن . لقد رأينا فى القسم 2-14 بناء على اعتبارات الطاقة أن مقدار سرعة الكتلة يكون فى نهايته العظمى عند $x = 0$ ويكون صفرًا عندما تكون x فى نهايتها العظمى (أى عندما $x = x_0$) . يمكننا أن نتوقع إذن أن قيمة v تتذبذب بين v_{max} و $-v_{max}$ بطريقة مشابهة لتذبذب x و a . وهذا صحيح بالطبع ، باستثناء أن v متفاوتة الطور بمقدار ربع دورة (90°) مع x و a ، ومن ثم فإنها توصف بالدالة $\sin(2\pi ft)$:

---

* تذكر أن الرمزين $x(t)$ و $a(t)$ يعنيان أن x و a يعتمدان على قيمة الزمن t . ويقرأ الرمز $x(t)$ هكذا : « x كدالة فى t » .

$$v = -v_{max} \sin (2\pi ft) \qquad (14\text{-}14)$$

حيث وجدنا سابقاً أن $v_{max} = x_0 \sqrt{k/m} = 2\pi f x_0$.

مثال 2-14 :

لنرجع مرة أخرى إلى المثال 1-14 . اكتب تعبيرى الموضع والسرعة كدالة فى الزمن . احسب موضع وسرعة وعجلة الكتلة عند اللحظة $t = 1.00$ s .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى المعطيات اللازم معرفتها لكتابة تعبيرى x و v ؟

الإجابة : التعبيرات العامة للحركة التوافقية البسيطة للكتلة m من $x = +x_0$ عند $t = 0$ هى :

$$x = x_0 \cos (2\pi ft)$$

$$v = -2\pi f x_0 \sin (2\pi ft)$$

$$a = -4\pi^2 f^2 x_0 \cos (\pi ft)$$

وبفحص هذه المعادلات الثلاث نجد أن كل ما نحتاج معرفته هو السعة x_0 والتردد f ، وهما معلومان من المثال 1-14 والمثال التوضيحى 1-14 .

سؤال : كيف يمكن إيجاد قيمة دالتى الجيب وجيب التمام عند $t = 1.00$ ؟

الإجابة : النقطة الهامة هى أن نتذكر أن الكمية $2\pi ft$ مقدرة بالزوايا نصف القطرية وليس بالدرجات .

الحل والمناقشة : نعلم من المثال التوضيحى 1-14 أن $f = 0.557$ Hz . وبوضع $t = 1.00$ s نحصل على :

$$2\pi ft = 2\pi (0.557 \text{ s}^{-1})(1.00 \text{ s}) = 3.50 \text{ rad}$$

وباستخدام الآلة الحاسبة نحصل على :

$$\cos (3.50 \text{ rad}) = -0.936 \qquad \sin (3.50 \text{ rad}) = -0.351$$

وحيث أن السعة $x_0 = 0.40$ m ، إذن بوضع $t = 1.00$ s نحصل على :

$$x = (0.40 \text{ m})(-0.936) = -0.37 \text{ m}$$

$$v = -2\pi(0.557 \text{ Hz})(0.40 \text{ m})(-0.351) = +0.49 \text{ m/s}$$

$$a = -4\pi^2 (0.557 \text{ Hz})^2(0.40 \text{ m})(-0.936) = +4.6 \text{ m/s}^2$$

وتبين الإشارات فى هذه الحالة أن x تقع يسار موضع الاتزان فى الشكل 4-14 ، وأن النقطة تتحرك إلى اليمين (عائدة من $-x_0$) وأن اتجاه عجلتها إلى اليمين .

مثال 3-14 :

تتحرك كتلة مقدارها 250 g حركة توافقية بسيطة تبعًا للعلاقة $x = (1.30\text{ m})\cos(2.09\,t)$.

(أ) ما هى سعة وتردد هذه الحركة ؟ (ب) ما قيمة ثابت القوة لهذا النظام ؟

(جـ) أوجد الزمن الذى تصل الكتلة عنده إلى الموضع $+\frac{1}{2}x_0$ لأول مرة بعد تحرير النظام .

استدلال منطقى :

سؤال : أين تظهر السعة والتردد فى العلاقات المعطاة ؟

الإجابة : من الصيغة العامة للحركة التوافقية البسيطة ، $x = x_0\cos(2\pi ft)$ ، يمكننا القول أن السعة x_0 هى ذلك العدد المضروب فى دالة جيب التمام . كذلك فإننا نرى أن العدد المضروب فى t داخل دالة جيب التمام يساوى $2\pi f$. وهكذا فإننا نستنتج من المعطيات أن $2\pi f = 2.09$.

سؤال : كيف يمكن تعيين ثابت القوة ؟

الإجابة : يتعين التردد f بثابت القوة k والكتلة m :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

أى أنه يمكن حساب k بمعلومية f .

سؤال : ما معنى العبارة « عندما تصل x إلى $\frac{1}{2}x_0$ لأول مرة » ؟

الإجابة : يجب أن نتذكر أن الكتلة سوف تمر بهذا الموضع مرات عديدة مع التغيرات الدورية فى قيمة $\cos(2\pi ft)$. أى أن المطلوب هو إيجاد أصغر قيمة للزمن t تحقق العلاقة $x = \frac{1}{2}x_0$.

سؤال : ما هى المعادلة التى تصف لنا متى يحدث ذلك ؟

الإجابة : تحل المعادلة (12-14) بالنسبة إلى أصغر زمن تتحقق عنده العلاقة $x(t) = \frac{1}{2}x_0$:

$$\frac{1}{2}x_0 = x_0\cos(2.09t) \qquad \text{أو} \qquad 0.500 = \cos(2.09t)$$

ولإيجاد t يلزم حساب معكوس جيب التمام :

$$\cos^{-1}(0.500) = 2.09t \qquad \text{(radians)}$$

الحل والمناقشة :

(أ) من معادلة الحركة نستنتج أن :

$$x_0 = 1.3\text{ m} \qquad \text{أو} \qquad 2\pi f = 2.09\text{ /s}$$

ومن العلاقة الأخيرة نجد أن $f = 0.333\ \text{Hz}$ ، ومنه $T = 1/f = 3.00\ \text{s}$.

(ب) ومن العلاقة $k/m = (2\pi f)^2 = (2.09)^2$ نحصل على :

$$k = (0.250\ \text{kg})(4.37\ \text{Hz}^2) = 1.09\ \text{N/m}$$

(جـ) أصغر قيمة للزمن t تحقق العلاقة $\cos^{-1}(0.500) = 2.09t\ \text{rad}$ هي :

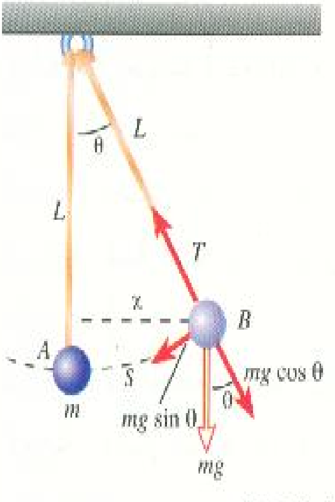
$$t = \frac{\cos^{-1}(0.500)}{2.09\ \text{Hz}} = \frac{1.05}{2.09\ \text{Hz}} = 0.500\ \text{s}$$

ويمكننا أن نرى من صيغة $x(t)$ أن $\cos(2\pi ft) = \cos 0 = 1$ عند $t = 0$ ، وهذا يبين أن الوضع الابتدائي للكتلة هو $+x_0$. ونحن نعلم أن الكتلة سوف تصل إلى الموضع $x = 0$ بعد ربع دورة ، أو $T/4 = 3.00\ \text{s}/4 = 0.750\ \text{s}$ ، حيث تمر بالموضع $x = \frac{1}{2}x_0$ لأول مرة وهي في طريقها إلى $x = 0$. وهذا يتفق مع الإجابة $t = 0.500\ \text{s}$ التي حصلنا عليها سابقًا .

14-6 البندول البسيط

نحن نعلم أن أي بندول بسيط كالمبين بالشكل 8-14 يتذبذب في حركة دورية . فإذا أمكن إثبات أن قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع الإزاحة عن موضع الاتزان فإننا نستنتج أن البندول يتحرك حركة توافقية بسيطة .

ومن المعلوم أيضًا أن البندول يكون في موضع الاتزان عندما يكون الخيط رأسيًا . وإذا أزيح البندول من موضع الاتزان بحيث يصنع الخيط زاوية θ مع الرأسي ، كما هو مبين



شكل 8-14:
البندول البسيط . قوة الاستعادة هي $mg \sin\theta \approx mg\,\theta$. لاحظ أن $\theta = s/L$ حيث s طول القوس بين النقطتين A و B .



أمثلة للبندولات : تهتز مراجيح الأطفال بتردد يعتمد على أطوالها .

بالشكل 8-14 ، سوف نجد أن هناك قوتين مؤثرتين على الكتلة m هما : الشد T وهو يؤثر على استقامة الخيط في اتجاه نقطة التعليق دائمًا ، والوزن mg ويؤثر رأسيًا إلى أسفل دائمًا . ومن الواضح أن صافي القوة نصف القطرية على استقامة الخيط ($T - mg\cos\theta$) يجبر الكتلة m على الحركة على قوس دائري نصف قطره يساوي طول البندول L . أما المركبة الماسية للوزن mg وتساوي $mg\sin\theta$ فتؤثر دائمًا على استقامة قوس الدائرة تجاه نقطة الاتزان . وعليه يمكننا كتابة :

$$F_{restoring} = -mg\sin\theta$$

حيث تبين الإشارة السالبة أن القوة في عكس اتجاه زيادة θ . لاحظ أن هذه القوة لا تتناسب مع الإزاحة الزاوية θ . ولكن في حالة الزوايا الصغيرة يمكننا استخدام حقيقة أن $\sin\theta \approx \theta$ ، حيث θ مقدرة بالزوايا نصف القطرية . (هذا التقريب يكون مضبوطًا إلى ثلاثة أرقام معنوية إذا كانت $\theta \ll 10°$ ، أى 0.174 rad) . ومن تعريف القياس نصف القطري للزوايا يمكننا أيضًا كتابة $\theta = s/L = x/L$. ومن ثم سوف تأخذ قوة الاستعادة الصورة :

$$F = -mg\theta = -\left(\frac{mg}{L}\right)x \qquad (14\text{–}15)$$

وهي صورة للعلاقة بين القوة والإزاحة في حالة SHM .

وبمقارنة هذه المعادلة بالصيغة العامة $F = -kx$ نجد مباشرة أن :

$$k = \frac{mg}{L}$$

ومنه يمكن الحصول مباشرة على تردد اهتزاز البندول :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}} \qquad (14\text{–}16)$$

لاحظ أن تردد البندول البسيط لا يعتمد على كتلة البندول ، ولكنه يعتمد فقط على الطول L وعجلة الجاذبية g . وبالرغم من بساطة هذه النتيجة إلا أنها تمثل طريقة دقيقة لقياس g . ويمكن تحقيق ذلك بقياس متوسط الزمن الدورى لبندول معلوم الطول ثم استخدامه لحساب التردد f ثم التعويض فى المعادلة (16-14) لحساب g :

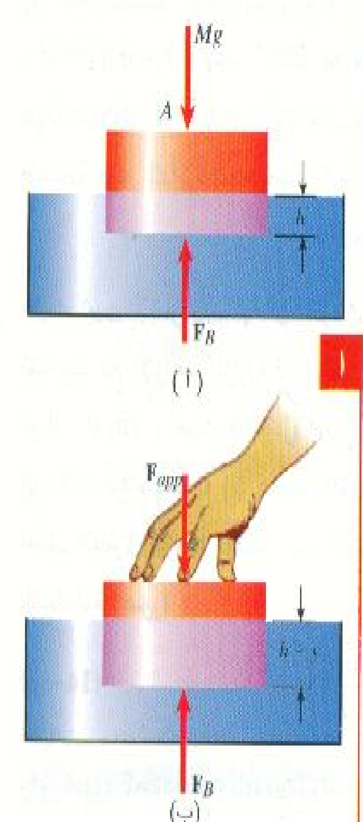
ومن الممكن كتابة معادلة حركة البندول كالتالي :

$$\theta = \theta_0\cos(2\pi ft) = \theta_0\cos\left(\sqrt{\frac{g}{L}}\,t\right)$$

تذكر أن النتائج السابقة تكون صحيحة عندما تكون سعة تأرجحات البندول صغيرة ، أى عندما تكون $\sin\theta \approx \theta$.

مثال 4-14 :

اعتبر قالبًا من الخشب كتلته M ومساحة مقطعه المستعرض A يطفو على سطح الماء كما هو مبين بالشكل 9-14 أ ، وافترض أن سمك الجزء المغمور من القالب في حالة الاتزان هو h . إثبت مستعينا بدراستك السابقة لقوى الطفو (الفصل التاسع) أنه إذا دفع القالب إلى أسفل مسافة صغيرة y (شكل 9-14 ب) ثم ترك حرا فإنه سوف يتذبذب إلى أعلى وإلى أسفل في SHM . (افترض أن اللزوجة مهملة) . استنتج كذلك تعبيرًا لتردد الذبذبات .



شكل 9-14:
(أ) قالب خشبي يطفو على سطح الماء . عمق الجزء المغمور من القالب h ؛ $F_B = Mg$. (ب) دفع القالب إلى أسفل مسافة إضافية y تحت تأثير القوة F_{app} . هذه العملية تؤدي إلى زيادة قوة الطفو بمقدار F_B' يتناسب مع y .

استدلال منطقي :

سؤال : كيف نثبت أن الحركة هي SHM ؟

الإجابة : يجب إثبات أن صافي قوة الاستعادة المؤثر على القالب يتناسب طرديًا مع الإزاحة y .

سؤال : ما هي القوى المؤثرة على القالب ؟

الإجابة : في حالة الاتزان يتعادل وزن القالب إلى أسفل مع قوة الطفو المؤثرة على القالب إلى أعلى .

سؤال : بماذا تتعين قوة الطفو ؟

الإجابة : هذه القوة تساوى وزن الماء المزاح بواسطة القالب .

إذن :
$$Mg = \rho_{H_2O}Ahg$$

في حالة الاتزان .

سؤال : إذا دفع القالب إلى أسفل مسافة إضافية قدرها y ؛ فما قيمة قوة الدفع الإضافية الناتجة عن ذلك ؟

الإجابة : هذه القوة تؤثر إلى أعلى ، وهي تساوى وزن الماء الإضافي المزاح ، أي $\rho_{H_2O}Ayg$.

سؤال : ما قيمة صافي القوة المؤثر على القالب عند تركه حرًا بعد دفعه مسافة قدرها y إلى أسفل ؟

الإجابة : هذه القوة تساوى قوة الطفو الإضافية بإشارة سالبة .

$$F = -(\rho_{H_2O}Ag)y$$

وحيث أن الكمية بين القوسين مقدار ثابت ، إذن هذه هي الصيغة العامة لتعريف الحركة التوافقية البسيطة . ويجب أن تكون قادرًا على إثبات أنه إذا رفع القالب مسافة صغيرة y إلى أعلى فإنك ستحصل على نفس النتيجة .

سؤال : بماذا يتعين تردد الحركة ؟

الإجابة : يمكن إيجاد التردد بمعلومية ثابت القوة k والكتلة M :

$$f = \frac{1}{2\pi} = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

سؤال : ما هو ثابت القوة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : هو دائمًا ثابت التناسب بين القوة والإزاحة . إذن ، فى هذه الحالة :

$$k = \rho_{H_2O} A g$$

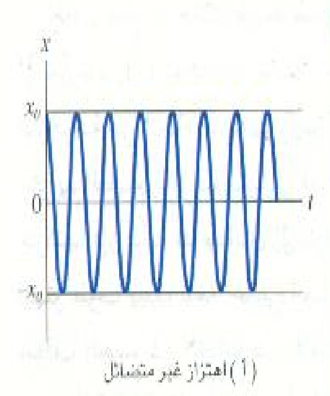
الآن أصبح لدينا كل المعلومات اللازمة لكتابة صيغة التردد f . تذكر الصيغة الرياضية لكتلة القالب :

$$M = \rho_{H_2O} A h$$

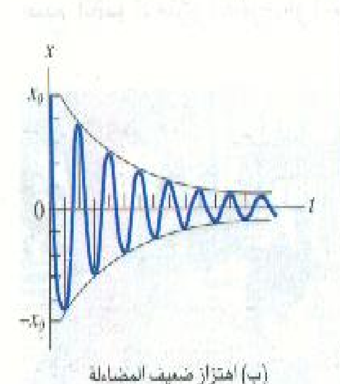
إذن ، بالتعويض عن M و k فى معادلة f نحصل على :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho_{H_2O} A g}{\rho_{H_2O} A h}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{h}}$$

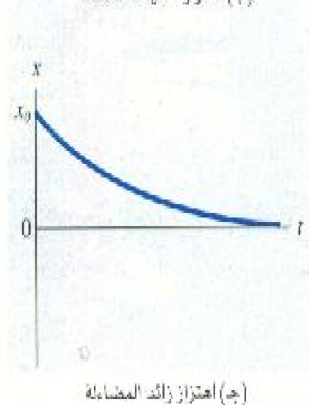
هذه النتيجة الهامة تبين أن التردد هنا على نفس صورة التردد فى حالة البندول البسيط ، حيث يحل عمق الجزء المغمور محل طول البندول .



(أ) اهتزاز غير متضائل



(ب) اهتزاز ضعيف المضاءلة



(جـ) اهتزاز زائد المضاءلة

شكل 10-14:
تعتمد طريقة اهتزاز النظام على مقدار الطاقة المفقودة فيه .

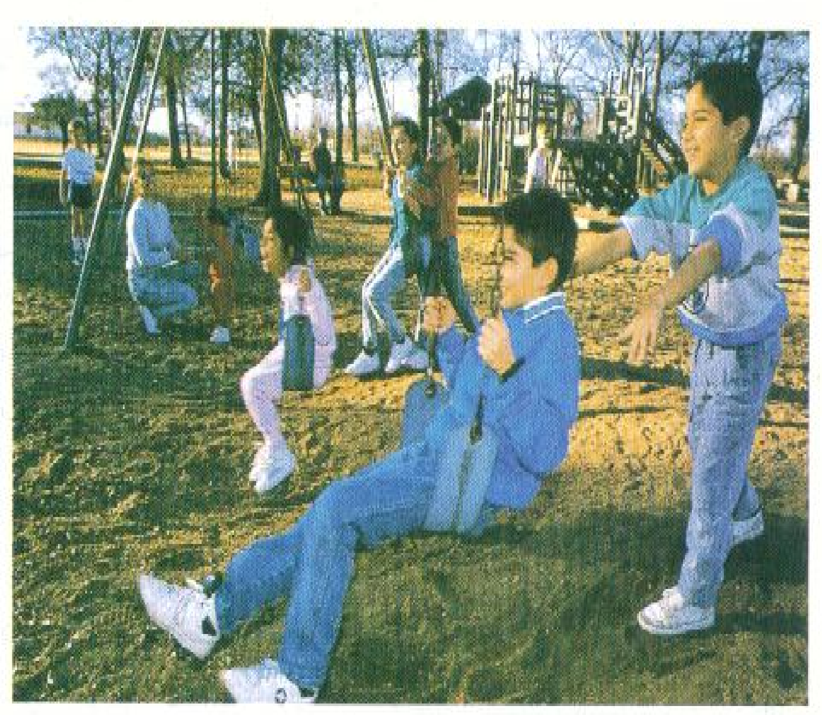
7-14 الاهتزاز القسرية والمتضائلة (المخمدة)

فى أى نظام حقيقى مهتز لابد أن يفقد بعض الطاقة للتغلب على قوى الاحتكاك . ونتيجة لذلك تقل سعة اهتزاز البندول أو الكتلة المثبتة فى طرف زنبرك مهتز باستمرار بمرور الزمن ، وهذه الحقيقة موضحة بالشكل 10-14 . ويمثل الجزء (أ) الحالة المثالية لاهتزاز نظام خال من الاحتكاك ، وهذه هى الحالة السابق مناقشتها فى الأجزاء السابقة . أما الجزء (ب) فيمثل حالة أكثر واقعية ، حيث يتأثر الاهتزاز بوضوح نتيجة لوجود قوى الاحتكاك ، وعندئذ يقال لمثل هذا النظام بأنه نظام يتضائل (أو مخمد) ، ويلاحظ فى هذه الحالة أن سعة الاهتزاز تتضاءل بسرعة ملحوظة بمرور الزمن .

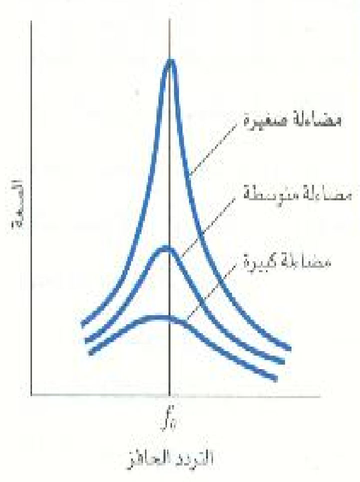
وعندما تكون قوى الاحتكاك كبيرة جدًا فإن النظام لا يهتز على الإطلاق ، ولكنه بدلاً من ذلك سوف يعود ببساطة إلى موضع اتزانه ببطئ شديد ، وهذا مبين بالشكل 10-14 جـ . ويوصف النظام فى مثل هذه الحالة بأنه زائد الضاءلة ، ويمكن أن يحدث هذا الموقف مثلاً إذا كانت الكتلة المثبتة فى طرف الزنبرك المهتز مغمورة فى سائل ذى لزوجة عالية جدًا . وفى مثل هذه الحالة لن تتحرك الكتلة بعد وصولها إلى موضع الاتزان ولن يشاهد الاهتزاز إطلاقًا . وإذا كانت قوى الاحتكاك كبيرة لدرجة تكفى بالكاد لكى يعود النظام إلى موضع الاتزان بدون أن يتجاوزه فإن النظام يوصف عندئذ بأنه خرج المضاءلة .

من الواضح إذن أنه لكى يهتز أى نظام لفترة ممتدة من الزمن لابد من تزويد النظام بالطاقة باستمرار لتعويض الطاقة المفقودة فى بذل الشغل ضد قوى الاحتكاك . فمثلاً ، لكى تستمر أرجوحة الطفل فى التأرجح بسعة ثابتة لابد من دفع الأرجوحة من وقت لآخر لتزويد النظام بالطاقة .

ونحن نعلم أن هناك طريقة صحيحة وأخرى خاطئة لدفع الأرجوحة إذا أريد لها أن تتأرجح إلى ارتفاعات عالية . والطريقة الصحيحة لتحقيق ذلك هى أن تدفع الأرجوحة فى اتجاه حركتها وليس فى الاتجاه العكسى ، وهذه هى الطريقة الوحيدة لتزويد النظام بالطاقة بشكل فعال . أما إذا دفعت الأرجوحة فى عكس اتجاه حركتها فإن ذلك قد يؤدى إلى توقف الاهتزاز فى نهاية الأمر ؛ ذلك أن الجسم المهتز سوف يبذل شغلاً على العامل الدافع مما يؤدى إلى فقدان تدريجى للطاقة وتوقف الجسم فى النهاية عن الاهتزاز . هذه الحقائق البسيطة لها أهمية كبيرة فى جميع أنظمة الاهتزاز القسرى أو المقود .



مثال للرنين : تزداد سعة اهتزاز الأرجوحة بسرعة عندما يقوم الشخص الواقف خلفها بدفعها دفعًا متطاورًا مع حركتها وبنفس تردد اهتزازها .



شكل 11-14 :
سعة الاهتزاز القسرى كدالة فى التردد f عند ثبوت القوة الحافزة . f_0 هو تردد الرنين للاهتزاز غير المتضائل . المنحنيات الثلاثة تمثل نفس النظام المهتز ، ولكن بدرجات مختلفة من النظام .

فى حالة الأنظمة المقودة يستمر النظام فى الاهتزاز دائمًا بواسطة قوة تكرارية خارجية مؤثرة على النظام ، وقد يكون تردد هذه القوة f مساويًا أو غير مساو للتردد الطبيعى لاهتزاز النظام f_0 . وتصل فعالية العامل الحافز فى إمداد النظام بالطاقة إلى أقصاها عندما يكون $f = f_0$. وعند جميع الترددات الأخرى لن تكون القوى الحافزة متفقة فى الطور تمامًا مع حركة النظام ، ولذلك يكون تأثير هذه القوة أقل فعالية فى إمداد النظام بالطاقة ؛ ويوضح الشكل 11-14 تغير سعة اهتزاز النظام مع تردد القوة المسلطة . لاحظ ، كما ذكرنا سابقًا أن فعالية القوة الحافزة فى إمداد النظام بالطاقة تكون أقصى ما يمكن عندما يكون ترددها f مساويًا للتردد الطبيعى f_0 للنظام ؛ وفى

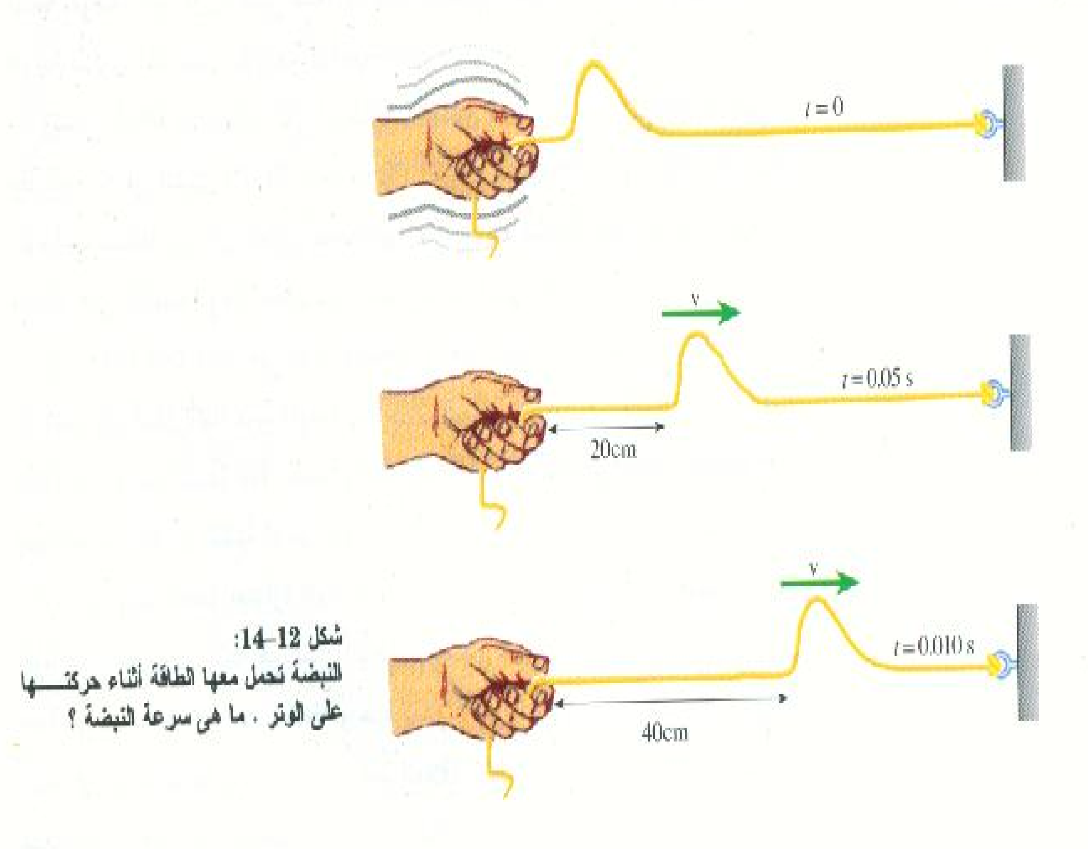
هذه الحال يقال أن القوة في حالة رنين مع النظام . هذا وسوف نتحدث تفصيلاً عن التردد f_0 ، الذي يسمى **بالتردد الرنيني** للنظام ، في القسم 10-14 .

8-14 المصطلحات الفنية للموجات

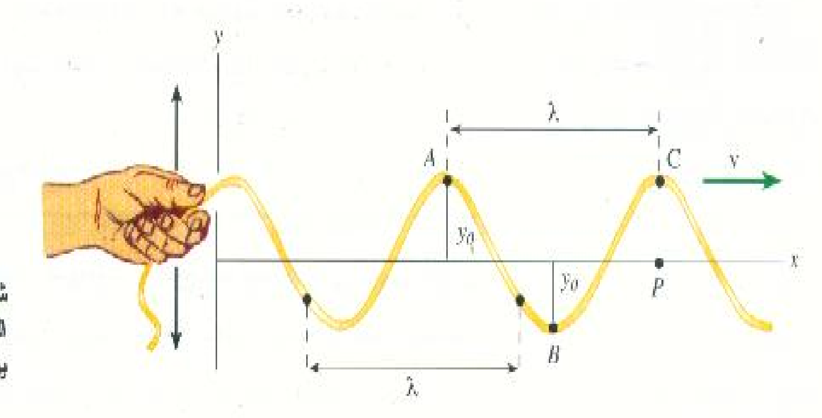
يعمل الكثير من الأجسام المهتزة كمصادر للموجات . فموجات الصوت على سبيل المثال يمكن أن تصدر من شوكة رنانة مهتزة أو وتر جيتار مهتز . وسوف نبدأ دراستنا للموجات بمناقشة نوع يمكن تخيله بسهولة ، وهو الموجة على وتر مشدود .

من الممكن إرسال اضطراب معين ليتحرك على الوتر كما هو مبين بالشكل 12-14 . ويبدأ هذا الاضطراب أو **النبضة** بحركة فجائية لليد إلى أعلى ثم إلى أسفل بسرعة كبيرة وهي ممسكة بطرف الوتر ، وعندئذ سوف يتحرك هذا الاضطراب على الوتر بسرعة v . لاحظ سمتين هامتين لمثل هذه النبضة . أولاً ، تحمل النبضة الطاقة وتنقلها معها بطول الوتر . فعندما تصل النبضة إلى نقطة معينة على الوتر فإنها تسبب اكتساب ذلك الجزء من الوتر طاقة حركة وطاقة وضع ، وهي الطاقة المستمدة من مصدر النبضة .

السمة الثانية هي أن النبضة تسجيل لما فعل المصدر . ويمكننا أن نرى من الشكل 12-14 أن اليد قد تحركت لبدء النبضة في لحظة معينة في الماضي . والواقع أن ما كان يفعله المصدر في أي لحظة ماضية t يظهر على الوتر على بعد قدره $x = vt$ من المصدر . ومعنى ذلك أن الوتر يتحرك على بعد x من المصدر نفس الحركة التي بدأها المصدر في لحظة سابقة $t = x/v$.



شكل 12-14:
النبضة تحمل معها الطاقة أثناء حركتها على الوتر . ما هي سرعة النبضة ؟



شكل 13-14:
المصدر المهتز فى حركة توافقية بسيطة يرسل موجة جيبية تتحرك على الوتر .

لنناقش الآن ما يحدث عندما يهتز المصدر فى حركة توافقية بسيطة ، كما هو مبين بالشكل 13-14 . من المتوقع عندئذ أن يحاكى الوتر نفس التاريخ القديم لطريقة اهتزاز طرفه بواسطة المصدر ، وأن الحركة إلى أعلى وإلى أسفل سوف تنتقل على الوتر بسرعة قدرها v ، وهى ما يطلق عليه **سرعة الموجة** . ونتيجة لذلك سوف يأخذ الوتر شكل منحنى جيب الزاوية فى أى لحظة ، وأن هذا الشكل الجيبى سوف يتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v حاملا مع الطاقة بطول الوتر ، وهى الطاقة السابق اكتسابها من المصدر .

وتستخدم لوصف مثل هذه الموجة كلمات معينة سنذكر أهمها فيما يلى . فالنقطتان A و C ، وهما قمتان على الشكل الموجى ، تسميان **قمتين موجيتين** ، بينما تسمى النقطة المماثلة للنقطة B **بالقيعان الموجية** . وتسمى أقصى إزاحة للوتر عن موقع اتزانه **بسعة الموجة** ، أى أن y_0 هى سعة الموجة الممثلة بالشكل 13-14 . لاحظ أن سعة الموجة تساوى فقط نصف الإزاحة الرأسية الكلية للوتر .

وتسمى المسافة بين قمتين على الموجة ، كالقمتين A و C مثلاً ، **بالطول الموجى** ، وقد رمزنا له فى الشكل 13-14 بالحرف λ (الحرف اللاتينى لامدا) . وهكذا فإن طول الموجة هو المسافة بين أى نقطتين متجاورتين على الموجة لهما نفس الطور ، أى أنه المسافة التى تقطعها الموجة خلال دورة اهتزاز كاملة لمصدر الموجات .

وإذا أخذنا نقطة ثابتة على الوتر كالنقطة P مثلاً سنجد أنها تتحرك حركة تكرارية إلى أعلى وإلى أسفل أثناء مرور الموجة بها خلال الحركة إلى اليمين . أى أنه خلال الزمن اللازم لكى يرسل المصدر طولاً موجبًا واحدًا لابد أن يمر طول موجى واحد بالنقطة P ، ويستنتج من ذلك أن النقطة P تمر بدورة كاملة واحدة من الحركة خلال نفس الزمن اللازم لكى يهتز المصدر اهتزازة كاملة واحدة . ومعنى ذلك أن دورة المصدر المهتز تساوى تمامًا دورة اهتزاز أى نقطة فى مسار الموجة ؛ ويسمى هذا الزمن اللازم لكى تهتز أى نقطة فى مسار الموجة اهتزازة كاملة واحدة **بدورة الموجة** T . وكما فى حالة النظام المهتز فإن تردد الموجة يرتبط بدورتها طبقًا للعلاقة $f = 1/T$. كذلك فإن التردد يساوى عدد القمم الموجبة المارة بالنقطة P فى كل ثانية .

وهناك علاقة هامة جدًا بين الطول الموجي والتردد . فإذا رجعنا مرة أخرى إلى الشكل 13-14 سنلاحظ أن المصدر يرسل طولاً من الموجة قدره λ خلال الزمن لاهتزازه اهتزازة كاملة واحدة T ، وعليه فإن الموجة تتحرك مسافة قدرها λ خلال الزمن T . وباستخدام العلاقة $v = x/t$ يمكننا أن نجد أن $v = \lambda / T$ ، حيث v سرعة الموجة . إذن :

$$\lambda = \frac{v}{f} \qquad \text{و} \qquad \lambda = vT \tag{14-17}$$

هذه العلاقة صحيحة لجميع الموجات ، وليس للموجات المتحركة على الأوتار فقط . ومن الضرورى الإشارة إلى أن التردد يتعين فيزيائيًا بتردد المصدر الموجى ، بينما تتعين سرعة الموجة بخواص الوسط الذى تنتقل فيه ؛ أما الطول الموجى فيساوى v/f طبقا للتعريف .

تعطى سرعة الموجة على الوتر بعلاقة بسيطة نذكرها هنا بدون إثبات . فإذا كان T هو الشد في الوتر وكانت m كتلة جزء من الوتر طوله L فإن سرعة انتشار الموجة على الوتر تكون :

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \tag{14-18}$$

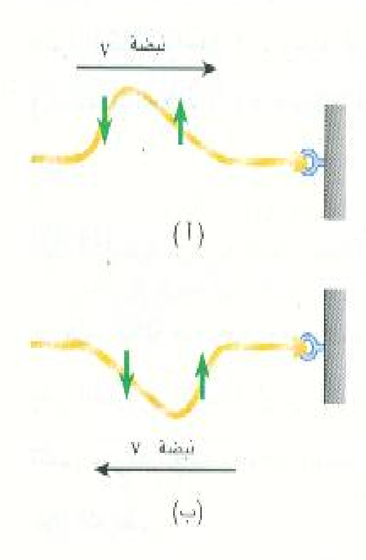
ويمكن تفسير لماذا يجب أن تعتمد سرعة الموجة على الشد فى الوتر وكتلة وحدة الطول منه كالتالى . الشد بالطبع هو المسئول عن القوة المسببة لتسارع قطعة الوتر عند مرور النبضة بمنطقتها ، وكلما زاد الشد كلما زادت العجلة وبالتالى زادت سرعة حركة النبضة . ومن جهة أخرى كلما زادت كتلة الوتر كلما كان عزم قصوره الذاتى كبيرًا ، ولذلك يجب أن تؤثر كتلة وحدة الطول من الوتر على سرعة حركة النبضة . وحيث أن عزم القصور الذاتى للوتر السميك يكون كبيرًا فإن سرعة النبضة عليه ستكون منخفضة نسبيًا .

مثال توضيحى 2-14

وتر جيتار كتلته 2.0 g وطوله 60 cm . ما قيمة الشد اللازم فى الوتر لكى تكون سرعة الموجة عليه 300 m/s ؟

استدلال منطقى : يمكن كتابة المعادلة 18-14 على الصورة $T = (m/L)(v^2)$ وحيث أن $v = 300$ m/s و $m = 0.0020$ kg و $L = 0.60$ m ، إذن $T = 300$ N . لاحظ أن هذا الشد كبير جدًا ، فهو يكافئ وزن كتلة قدرها 30 kg تقريبًا معلقة فى الوتر . ■

14-9 انعكاس الموجة



شكل 14-14:
تنقلب النبضة المتحركة على الوتر عند الانعكاس من الطرف الثابت . تبين الأسهم الرأسية حركة أجزاء الوتر المختلفة .

لكي تنتقل الموجة على الوتر الموضح بالشكل 13-14 ، يجب أن يكون هذا الوتر مثبتًا تثبيتًا جيدًا من طرفه الأيمن . وحيث أن الموجة لا يمكن أن تستمر في الحركة إلى ما بعد نقطة التثبيت ، يتحتم علينا مناقشة ما يحدث للطاقة التي تحملها الموجة لأن الطاقة لا يمكن أن تختفي . وهنا يمكن أن يحدث شيئان : (1) قد يمتص بعض الطاقة بواسطة الحامل عند نقطة التثبيت ، (2) قد ينعكس بعض الطاقة إلى الخلف ، وبذلك تتحرك الموجة على الوتر إلى اليسار . ولتبسيط المناقشة سوف نفترض أن الامتصاص مهمل وأن الطاقة كلها تنعكس خلفًا ، وهذا صحيح تقريبًا في معظم الحالات .

ولدراسة هذه الظاهرة لنتبع نبضة موجية واحدة تتحرك على الوتر إلى اليمين ، كما هو مبين بالشكل 14-14 أ . عندما تصل هذه النبضة إلى الحامل فإنها تؤثر عليه بقوة معينة إلى أعلى ، وحيث أن الحامل مثبت في مكانه فإنه لن يتحرك ، ولكنه سوف يؤثر على الوتر بقوة مساوية ومعاكسة إلى أسفل ، وهذه القوة سوف تسبب بالتالي تسارع الوتر إلى أسفل لينخفض بذلك عن موضع الاتزان مسافة تعتمد على كمية تحركه . ونتيجة لذلك تنقلب النبضة رأسًا على عقب عند اصطدامها بالحامل ؛ ولذلك تبدو النبضة المنعكسة كما هو موضح بالشكل 14-14 ب . وإذا كان الوتر حرًا تمامًا في أن يتحرك إلى أعلى وإلى أسفل عند الطرف الأيمن فإن النبضة لن تنقلب بالرغم من أنها سوف تنعكس لأن الطاقة لا يمكن أن تختفي هكذا ببساطة عند الطرف الأيمن للوتر . وتلخيصًا لذلك نقول أن **الموجة تنقلب بالانعكاس عند الطرف الثابت ، وتنعكس بدون انقلاب عند الطرف الحر .**

ولنعتبر الآن ما يحدث عند التقاء نبضة منعكسة متحركة على وتر إلى اليسار مع نبضة أخرى متحركة على نفس الوتر تجاه اليمين . يمثل الشكل 15-14 أ نبضتين مستطيلتين* تتحركان في اتجاهين متضادين على نفس الوتر . عندما تلتقي هاتان الموجتان سوف تبدأن في التراكب إحداهما مع الآخرى . وعندئذ سيكون الموقف كما هو مبين بالشكل 15-14 ب ، حيث يمثل الخطان المتقطعان موضعي كل من الموجتين وحدها عندما لا تكون الأخرى موجودة ، بينما يمثل الخط الأخضر الإزاحة الفعلية في

* قد يتساءل بعضنا عن طريقة الحصول على نبضة موجية بهذا الشكل . الحقيقة أنه يمكن الحصول على نبضة موجية بأي شكل نريد ، بما في ذلك النبضات المستطيلة الشكل ، باستخدام مجموعة كبيرة من النبضات الموجية ذات الترددات المختلفة في نفس الوقت . ويمكن تحقيق ذلك عادة باستخدام دوائر إلكترونية معينة للحصول على نبضات كهربائية بالشكل المطلوب . وقد استخدمنا هنا نبضات افتراضية مستطيلة الشكل لأنها ثابتة السعة ، ومن ثم يكون جمع السعات في حالة التراكب أبسط مما في حالة الأشكال الموجية الأخرى .

حالة التراكب . ويتضح بناء على ذلك أن صافى الإزاحة يساوى المجموع الاتجاهى لإزاحتى الموجتين ، وهذا مثال لما يسمى **مبدأ التراكب** :

إذا وقعت نقطة تحت تأثير نبضتين موجيتين أو أكثر فى نفس الوقت فإن إزاحتها المحصلة تساوى المجموع الاتجاهى للإزاحات الناتجة عن النبضات المنفردة .

وينطبق هذا المبدأ على جميع الموجات التى نتعامل معها فى هذا الكتاب .

الآن يمكننا تطبيق هذا المبدأ لنرى ما يحدث عندما تنعكس موجة جيبية متحركة على وتر مشدود عند الطرف الثابت ، وهذا الموقف موضح بالشكل 16-14 . عندما تصل النبضة الساقطة إلى نقطة التثبيت فإنها تنعكس وتنقلب كما هو مبين بالجزء (أ) . ويمثل الجزء (ب) من الشكل موجتان افتراضيتان إحداهما ساقطة والأخرى منعكسة . وقد وصفت الموجتان بأنهما « افتراضيتان » لأن الوتر نفسه لا يخضع لأى منهما على حدة ، بل إنه يقوم بجمع الموجتين ويتخذ الشكل المبين بالجزء (جـ) فى اللحظة التى تمثل موضعى الموجتين الساقطة والمنعكسة فى الجزء (ب) . لاحظ أن إزاحة الوتر عند نقطة التثبيت تساوى صفرًا ، وأنها يجب أن تكون صفرًا دائمًا . وبالإضافة إلى ذلك يلاحظ أن الإزاحة تساوى صفرًا أيضًا عند عدة نقط أخرى فى نفس اللحظة .









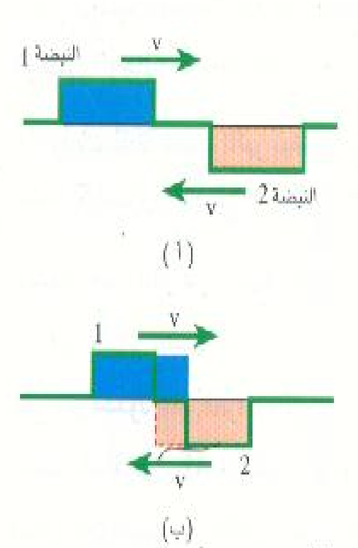


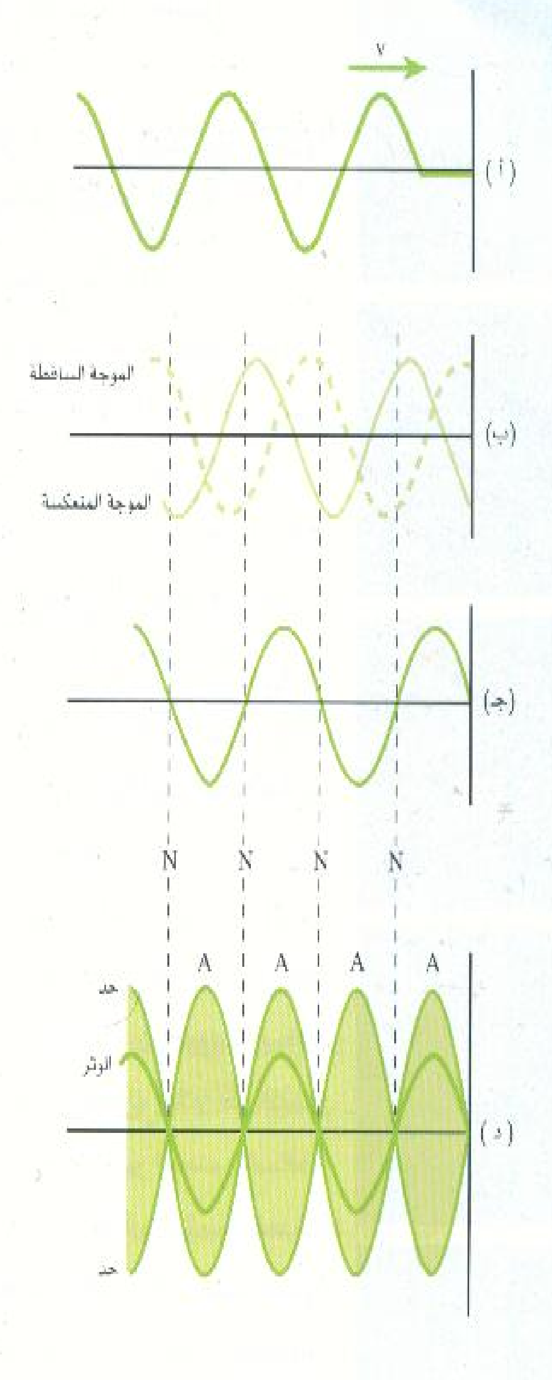
تمثل هذه المجموعة المتتابعة من الصور نبضة موجية تتحرك على حبل فى الاتجاه إلى اليمين ثم تنعكس عند النهاية الثابتة للوتر . لاحظ أن النبضة المنعكسة المتحركة إلى اليسار مقلوبة بالنسبة إلى الموجة الساقطة .

بهذا نكون قد وصلنا إلى أهم جزء فى الموضوع . لنفرض أننا قد أعدنا رسم الشكل 16-14 ب عند أية لحظة أخرى . إذا فعلنا ذلك سوف نجد أنه بالرغم من أن الموجتين الساقطة والمنعكسة تحتلان موضعين مختلفين فى الرسم الجديد ، فإن مجموعهما سيظل صفرًا عند نفس النقط المبينة فى الجزء (جـ) . أى أن الوتر لا يتحرك إطلاقًا عند النقطة N فى هذا الشكل . وإذا راقبنا هذا الوتر أثناء حركته تحت تأثير الموجتين الساقطة والمنعكسة فإنه يبدو لنا ضبابيًا غير واضح أثناء اهتزازه ذهابًا وإيابًا بين الحدين الموضحين بالجزء (د) . وتسمى النقط N التى لا تتحرك إطلاقًا بالعقد ؛ بينما تسمى النقطة A الواقعة فى منتصف المسافة بين كل عقدتين والتى تعانى أكبر حركة ، **بالبطون** . ويعرف هذا النوع من الاهتزاز الذى يهتز فيه الوتر ذهابًا وإيابًا داخل غلاف (أو منحنى حدى) واضح تمامًا **بالموجة المستقرة (أو الواقفة)** ، وهى ما سنتعرض لمناقشته ببعض التفصيل بعد قليل .

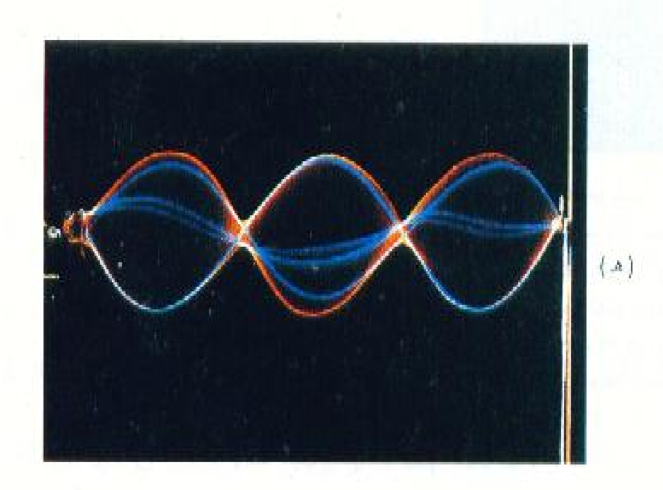
والآن إذا نظرنا إلى الموضع اللحظى للوتر فى الجزء (د) يمكننا القول أن العقد تبعد عن بعضها البعض مسافات تساوى نصف الطول الموجى . وبالمثل ، فإن المسافة بين بطنين متتاليين تساوى $\frac{1}{2}\lambda$ أيضًا . علينا إذن أن نتذكر الحقيقة الهامة الآتية :

المسافة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتاليين فى الموجة المستقرة تساوى $\frac{1}{2}\lambda$.



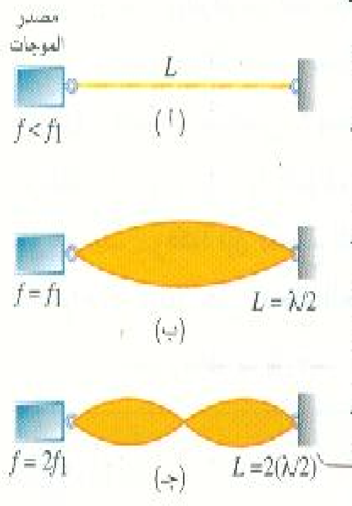


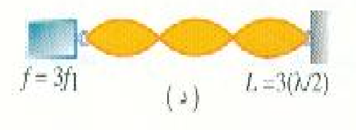
شكل 15-14:
مبدأ التراكب . الخط الأخضر يوضح الشكل الفعلى للوتر أثناء حركة النبضتين الزرقاء والحمراء عليه فى اتجاهين متضادين . (أ) قبل التراكب يأخذ الوتر شكل النبضتين المنفردتين . (ب) فى منطقة التراكب تجمع سعتا النبضتين جبريًا ، ولذلك تكون الإزاحة المحصلة للوتر صفرًا فى هذه الحالة .

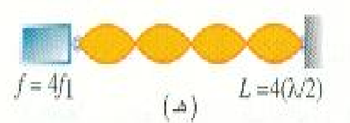


شكل 16-14:
ينتج الموجة الساقطة ، أو الرنين ، للوتر المهتز عندما تقوى الموجتان الساقطة والمنعكسة إحداهما الأخرى . وتسبب محصلة الموجتين الساقطة والمنعكسة تكون العقد والبطون على الوتر (سعة كل من الموجتين فى الأجزاء (أ) إلى (د) مبالغ فيه كثيرًا) (هـ) صورة فوتوغرافية للوتر كما فى الجزء (د) .

14-10 الرنين الموجي : الموجات المستقرة على وتر







شكل 17-14:
رنين وتر مشدود .

عند تحريك بندول أو أرجوحة أطفال أو كتلة مثبتة في طرف زنبرك باستخدام قوة دورية يتحرك النظام بأكبر سعة عندما يكون تردد القوة مساويًا للتردد الطبيعي لاهتزاز النظام . وقد استخدمنا في القسم 7-14 مثال دفع أرجوحة الأطفال لإثبات ظاهرة الرنين ، أي اهتزاز النظام بأكبر شدة ممكنة عند تساوي تردد القوة الحافزة مع تردد الاهتزاز الحر للنظام . ويوجد موقف مشابه لذلك في حالة اهتزاز الأوتار ؛ كما هو موضح بالشكل 17-14 . فإذا قمنا بهز الوتر بتردد منخفض جدًا فإن الوتر سيهتز اهتزازًا ضعيفًا جدًا بحيث يبدو عديم الحركة ، كما بالشكل 17-14 أ . وبزيادة تردد الاهتزاز ببطئ سوف يبدأ الوتر في الاهتزاز بقوة عند تردد معين ، كما بالشكل 17-14 ب . وعند هذا التردد الرنيني الأساسي f_1 يهتز الوتر اهتزازًا واسعًا ويظهر كشيء ضبابي غير واضح المعالم بين الحدين الموضحين ، وهذا مثال واضح لظاهرة الموجات المستقرة المذكورة آنفًا هذا وتبين التجربة أن الوتر يرن أيضًا عند ترددات أعلى أخرى ، كما هو مبين بالأجزاء (ب) ، (جـ) ، (د) من الشكل . وملخص ذلك أن حالة رنين الوتر تحدث عند التردد الأساسي f_1 ، وعند ترددات أعلى قدرها $2f_1$ ، $3f_1$ ، $4f_1$ . . . . وهكذا .

وهناك طريقة سهلة لتحديد الشروط التي يحدث عندها الرنين . فبالنظر إلى الشكل 17-14 يمكننا ملاحظ أن الوتر يرن في قطع صحيحة ـ حيث تعني **القطعة** المسافة بين عقدتين متجاورتين أو بطنين متجاورين ـ وأن الطرفين الثابتين عقدتان دائمًا . وعليه فإن الوتر يرن عندما يساوي طوله قطعة واحدة أو قطعتين . . . وهكذا . وحيث أن طول القطعة $\frac{1}{2}\lambda$ فإن ذلك يعني حدوث الرنين عندما يكون طول الوتر $\lambda/2$ أو $2(\lambda/2)$ أو $3(\lambda/2)$ . . . وهكذا ، وبذلك يمكننا القول عمومًا أن الوتر المثبت بشدة من طرفيه يمكن أن يرن إذا كان طوله عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجي . فمثلاً طول الوتر في الشكل 17-14 ب ـ د يساوي $\lambda/2$ و $2(\lambda/2)$ و $3(\lambda/2)$ و $4(\lambda/2)$. إذن ، يمكن كتابة شرط الرنين في حالة وتر مثبت من طرفيه على الصورة :

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} \qquad (14-19)$$

حيث $n = 1, 2, 3, ...$ ؛ λ_n هو الطول الموجي عندما يرن الوتر في عدد قدره n من القطع . وحيث أن الطول الموجي يرتبط بالتردد تبعا للمعادلة (17-14) ، يمكننا أن نرى مباشرة أن رنين الوتر المثبت من طرفيه يحدث فقط عند ترددات خاصة جدًا ، ويقال عندئذ أن الترددات الرنينية للوتر تكمية ، بمعنى أن هذه الترددات لها قيمة حادة محددة يفصل بينهما ثغرات من الترددات المحظورة . ومن الواضح أن قيم الترددات الرنينية تساوي مضاعفات صحيحة للتردد الرنيني الأساسي f_1 :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L/n} = n\frac{v}{2L} = nf_1$$

وترتبط الترددات الرنينية للأوتار المشدودة عادة بالأصوات الموسيقية الصادرة عن الآلات الوترية . وبالرغم من أننا سوف نرجئ المناقشة التفصيلية للصوت إلى الفصل التالى ، فإن هذه العلاقة تعطينا بعض المفردات الإضافية المستخدمة لوصف الموجات المستقرة . فالتردد الأساسى f_1 يسمى أحيانًا **بالتوافقية الأولى** ، بينما تعرف الترددات f_1 ، f_2 ، f_3 ، f_4 بالتوافقيات الثانية والثالثة والرابعة والتوافقية رقم n على الترتيب . وهكذا فإن مصطلح **التوافقية** يشير إلى **اهتزاز موجى جيبى ذى تردد واحد** ، بينما يشير مصطلح **الحركة التوافقية البسيطة** إلى حركة دورية ذات تردد واحد يمكن وصفها بدالة جيب أو جيب تمام .

مثال 5-14 :

وتر طوله 6.0 m وسرعة الموجات عليه 24 m/s . ما هى ترددات القوة الحافزة التى يرن عندها هذا الوتر ؟ ارسم شكلاً للوتر عند التوافقيات الثلاث الأولى .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو شرط الرنين الموجى للوتر ؟

الإجابة : يجب أن يكون طول الوتر عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجى ، ويمثل هذا الشرط رياضيًا بالمعادلة :

$$L = n\left(\frac{\lambda_n}{2}\right) \quad \text{أو} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

سؤال : ما هى علاقة هذه الأطوال الموجية الرنينية بالترددات الرنينية ؟

الإجابة : العلاقة بين الترددات والأطوال الموجية لكل الموجات هى $v = f\lambda$. وفى حالتنا هذه :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

سؤال : ماذا سيكون شكل الموجات الرنينية الثلاث الأولى ؟

الإجابة : الموجة الرنينية مصطلح آخر للموجة المستقرة . وبالنسبة للموجات المستقرة الثلاث الأولى سيأخذ الوتر الشكل الموجى لعروة واحدة أو اثنتين أو ثلاث عروات بين طرفيه الثابتين ؛ وهذا موضح بالشكل 17-14 ب ، جـ ، د .

الحل والمناقشة : باستخدام معطيات المثال نجد أن الأطوال الموجية الثلاث الأولى كالتالى :

$$\lambda_1 = \frac{12m}{1} = 12 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{12m}{2} = 6.0 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = \frac{12m}{3} = 4.0\text{ m}$$

وتكون الترددات المناظرة كالتالى :

$$f_1 = \frac{24\text{ m/s}}{12\text{ m}} = 2.0\text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{24\text{ m/s}}{6.0\text{ m}} = 4.0\text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{24\text{ m/s}}{4.0\text{ m}} = 6.0\text{ Hz}$$

مثال : إذا كان الوتر يرن فى ثلاث قطع عند التردد $f = 11$ Hz ، فما هى سرعة الموجات ؟

الإجابة : 44 m/s .

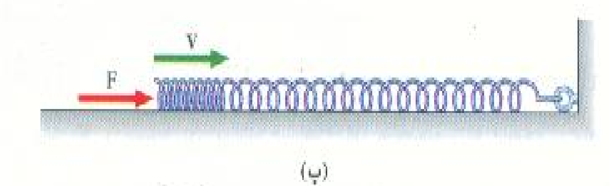
14-11 الموجات المستعرضة والطولية

لقد استنفدنا وقتًا طويلاً فى مناقشة الموجات المنتشرة على وتر مشدود لأننا نستطيع رؤية الشكل الموجى للوتر بسهولة ، كما أن المبادئ التى تنطبق عليها تنطبق أيضًا على كثير من الأنظمة المهتزة الأخرى . والموجات على الأوتار ما هى إلا مثال للموجات **المستعرضة** . وقد أطلق هذا الاسم عليها لأن جسيمات الوتر - أو جسيمات **الوسط** التى تنتشر فيه الموجات عمومًا - تتحرك فى اتجاه عمودى (أو **مستعرض**) على اتجاه انتشار الموجة . فمثلاً ، عندما تنتشر الموجة على وتر من اليسار إلى اليمين يتحرك الوتر نفسه إلى أعلى وإلى أسفل .

سوف نتعرف الآن على نوع آخر من الموجات بمساعدة التجربة الآتية . يستخدم فى هذه التجربة زنبرك طويل موضوع على سطح منضدة ملساء ومثبت من أحد طرفيه ، ويوضح الشكل 18-14 أ الزنبرك فى حالة الاتزان . والآن إذا ضغط الزنبرك فجأة كما فى الجزء (ب) فإن الحلقات القريبة للطرف الذى سلطت عليه القوة الضاغطة سوف تنضغط قبل أن يتعرض باقى الزنبرك إلى الاضطراب . ونتيجة لقوى المرونة المتولدة فى هذا الجزء من الزنبرك سوف تؤثر الحلقات المنضغطة بقوة معينة على الحلقات الواقعة على يمينها ، وبذلك ينتقل الانضغاط بطول الزنبرك إلى اليمين . وعندما يصل الانضغاط إلى الطرف المثبت تنعكس الطاقة الانضغاطية ، وبذلك ينعكس الانضغاط ليتحرك إلى اليسار ، كما هو مبين فى (د) .

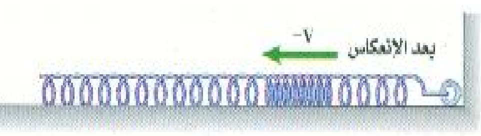
من الواضح أن هذه الموجة ليست مستعرضة لأن أجزاء الزنبرك تهتز ذهابًا وإيابًا فى نفس اتجاه انتشار الموجة بطول الزنبرك . وتسمى مثل هذه الموجة التضاغطية ، التى تتحرك فيها جسيمات الوسط فى اتجاه انتشار الموجة **بالموجة الطولية** .

(أ)



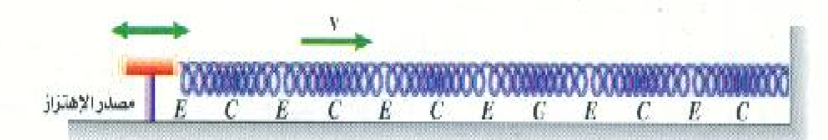
(ب)

(جـ)

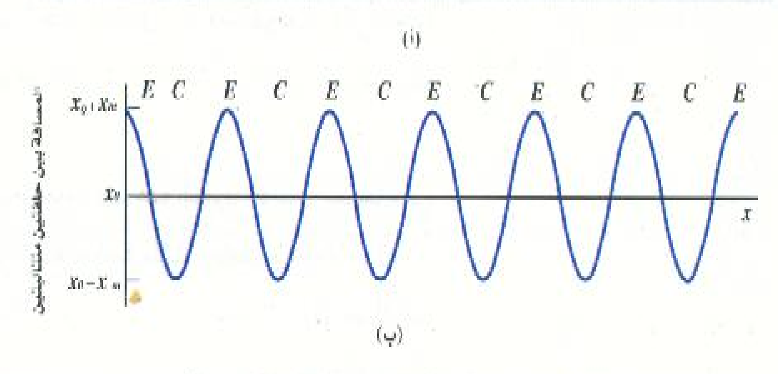


(د)

شكل 18-14:
نبضة طولية تتحرك بطول الزنبرك ثم تنعكس عند الطرف الثابت .



(أ)



(ب)

شكل 19-14:
(أ) موجة طولية مكونة من تضاغطات وامتدادات متعاقبة على زنبرك . (ب) منحنى التضاغطات C والامتدادات E للزنبرك والمبينة فى الشكل 19-14 أ. قيمة x_0 تمثل المسافة الفاصلة بين الحلقات عندما لا يكون الزنبرك مضطربًا .

ويمكننا توليد موجة طولية مستمرة بتوصيل الطرف الحر للزنبرك بمصدر مهتز يقوم بدفع هذا الطرف وشده بالتناوب بتردد f ، وعندئذ سوف ترسل بطول الزنبرك مناطق مكدسة الحلقات بالتناوب مع مناطق ممتدة الحلقات ، وهذا موضح بالشكل 19-14 أ . فإذا كان مصدر الاهتزاز يقوم بتحريك طرف الزنبرك حركة توافقية بسيطة ، يمكن تمثيل المسافة بين الحلقات المتجاورة على الزنبرك بالمنحنى المبين بالشكل 19-14 ب . **لاحظ أن التغير فى امتداد وانضغاط الحلقات يتبع منحنى جيبيًا .**

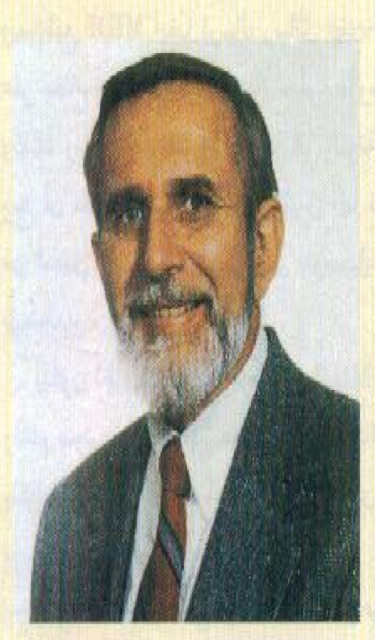
إضافة إلى ما سبق نقول أن هذا النسق الموجى من التضاغط والامتداد يتحرك بطول الزنبرك بسرعة معينة تتوقف على خواص الزنبرك . ويمكننا وصف الموجة الطولية بمساعدة الشكل 19-14 ب بدلالة نفس المصطلحات السابق استخدامها فى حالة الموجات المستعرضة . فالطول الموجى هو المسافة بين أى تضاغطين متتاليين أو أى امتدادين

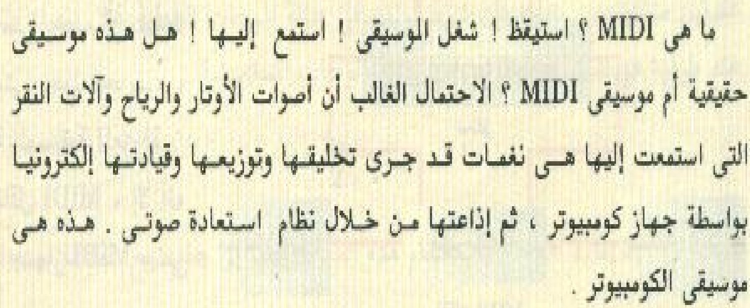
متتاليين . والسعة هى الفرق بين المسافة الفاصلة بين حلقتين متجاورتين عند أقصى انضغاط (أو أقصى امتداد) والمسافة بينهما فى حالة اتزان الزنبرك . كذلك فإن نفس العلاقة بين السرعة v والتردد f والطول الموجى λ ، أى العلاقة $v = f\lambda$ ، تظل صحيحة أيضًا فى حالة الموجات الطولية .

وتعتبر الموجات الصوتية واحدة من أهم أمثلة الموجات الطولية ، وهذا سوف يكون موضوع دراستنا فى الفصل التالى .

الفيزيائيون يعملون فيكتور أ . ستانيونيس ، كلية أيونا

موسيقى الكومبيوتر : العلم والتكنولوجيا لفن جديد





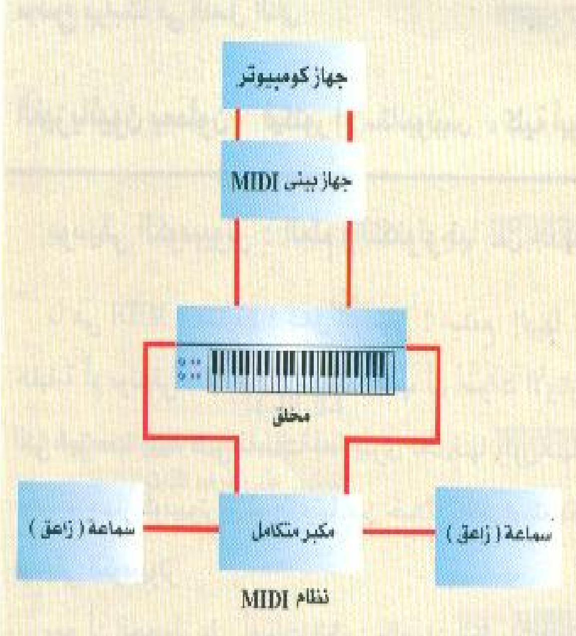
ما هى MIDI ؟ استيقظ ! شغل الموسيقى ! استمع إليها ! هل هذه موسيقى حقيقية أم موسيقى MIDI ؟ الاحتمال الغالب أن أصوات الأوتار والرياح وآلات النقر التى استمعت إليها هى نغمات قد جرى تخليقها وتوزيعها وقيادتها إلكترونيا بواسطة جهاز كومبيوتر ، ثم إذاعتها من خلال نظام استعادة صوتى . هذه هى موسيقى الكومبيوتر .

ومع أن الحصول على أصوات الطنين والصراخ إلكترونيًا قد تحقق بنجاح على نطاق تجريبى منذ زمن طويل ، إلا أنها نادرًا ما كانت تستخدم خارج المختبرات الجامعية والصناعية . ومع بداية الستينيات من هذا القرن تحقق النجاح الباهر فى تسجيل « موسيقى باخ » المخلقة إلكترونيا ، وتعرف جمهور العامة على هذا النوع من الموسيقى . ومنذ ذلك الحين تحولت دنيا الموسيقى إلى العصر الإلكترونى واندفعت كالمنجنيق إلى عالم الكومبيوتر .

كان الصوت فى « موسيقى باخ » بسيطًا « ورقيقًا » ، وكان يعتمد على الصوت المولد باستخدام جهاز تخليق رقمى يسمى MOOG . ومن المفهوم أن هذا التسجيل كان يفتقر إلى الأصوات المعقدة التى تصدرها الآلات الموسيقية التقليدية بكل ما يصاحبها من النغمات التوافقية . ومع أن الموسيقيين قد حاولوا حل هذه المشكلة محاولات مضنية باستعمال عدد من المخلقات التى تعزف فى نفس الوقت ، إلا أن مشاكل عدم الاتساق بين هذه المخلقات أثبتت فشل هذه الطريقة فشلاً ذريعًا فى محاكاة الآلات الموسيقية التقليدية .

وفى أوائل الثمانينيات ابتكر الفيزيائيون والمهندسون طريقة لتخليق أصوات الآلات الموسيقية القديمة وتوليد أصوات آلية جديدة باستخدام تكنولوجيا الكومبيوتر الرقمى ، حيث استبدل صراخ المخلقات الرقمية بموسيقيين يستخدمون نظام MIDI الموسيقى والكومبيوتر . ويبدو هذا كما لو كان لديك فرقة موسيقية أو أوركسترا فى داخل الكومبيوتر ، وأن هذه الفرقة تعزف لك ما تريد من الموسيقى وبالطريقة التى تطلبها تمامًا . وفى التخليق الرقمى تولد الفولتيات الواصلة إلى السماعات من معادلات رياضية محملة فى المخلق ؛ ويحتوى كل مخلق رقمى على معالجة ميكروئية واحدة على الأقل .

MIDI هى كلمة أولية مكونة من الحروف الأولى لعبارة « الجهاز البينى الرقمى للآلات الموسيقية »* ، ويتكون MIDI من أجهزة حاسب وبرامجيات قياسية قام بتصميمها صانعو الأجهزة الإلكترونية لتحقيق الانسجام بين الآلات الموسيقية المختلفة . ويستخدم كل مخلق طريقة لتوليد الصوت ومحاكاة الأصوات الآلية المختلفة ، ولذلك فإن بعض المخلقات أفضل فى محاكاة صوت البيانو وبعضها الآخر أفضل فى محاكاة صوت الجيتار . وقد أدت الحاجة إلى الحصول على أفضل الأصوات من كل مخلق إلى ابتكار أسلوب لتوصيلها بطريقة متسقة ، وهو ما يعرف بنظام MIDI القياسى .



ويحدد نظام MIDI القياسى الأشياء الضرورية كهيئة البيانات المنقولة خلاله وكذلك نوع الوصلة الفيزيائية - ناقل MIDI - المركبة فى الآلة والوصلات المصاحبة ، كما أنه يحدد أيضًا فلطية الإشارات ومعدل إرسالها . وتعرف الآلات التى يمكنها استقبال وإرسال شفرات MIDI بأجهزة MIDI . ويستطيع MIDI أيضًا إرسال رسائل تبين متى يجب أن يضغط على مفتاح معين فى لوحة المفاتيح أولاً ، ومتى يجب تحريره ، وكذلك رسائل عن الفروق الدقيقة فى النوتة الموسيقية المعزوفة . ومع أن معظم أجهزة الكومبيوتر ليس بها ناقل MIDI ، إلا أنه من السهل تحويل ناقل التوالى بتوصيل جهاز MIDI بينى باستخدام « فيشة » واحدة .

يتكون نظام موسيقى الكومبيوتر MIDI ، كما هو مبين بالشكل ، من جهاز كومبيوتر وجهاز MIDI بينى ومخلق موسيقى ونظام صوتى . ويستطيع هذا النظام محاكاة أصوات أكثر الآلات الموسيقية تعقيدًا ، ويمكنه وحده إحياء حفل لموسيقى الروك بتكاليف بسيطة فى متناول الشباب العادى . وباستخدام البرامجيات المناسبة يمكن تحويل الكومبيوتر الشخصى إلى مركز موسيقى راق على أحدث المستويات .

إننى كأستاذ جامعى أبحث دائمًا عن طرق جديدة لإثارة طلابى وإمتاعهم بموضوعاتهم الدراسية . وقد منحنى حلول عصر الكومبيوتر والجاذبية الساحرة للموسيقى وسيلة ذهبية لتدريس الفيزياء بطريقة غير تقليدية ، وخاصة للطلاب غير المتخصصين فى الفيزياء ، وذلك بمساعدة موسيقى الكومبيوتر .

12-14 الموجات التضاغطية المستقرة على زنبرك

هناك سمات مشتركة كثيرة بين الموجة الطولية على زنبرك والموجة المستعرضة على وتر . فإذا أرسلت موجة طولية لتتحرك على زنبرك فإن الموجة وطاقتها تنعكسان دائمًا عند وصول الموجة إلى طرف الزنبرك ، وهذه الموجة المنعكسة يمكنها أن تتداخل مع الموجات التى يرسلها المصدر فى لحظات تالية . فإذا تحققت العلاقة المناسبة بين تردد المصدر ومختلف ثوابت الزنبرك سوف يحدث الرنين ، وهذا ما سندرسه الآن .

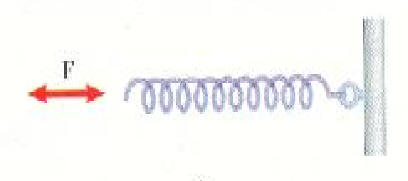
كما فى حالة رنين الأوتار ، توجد دائمًا عقدة بالقرب من المصدر الحافز فى نظام

* Musical Instrument Digital Interface MIDI .

الزنبرك لأن الزنبرك يتحرك فى حالة الرنين حركة أكبر كثيرًا مـن المصدر . وأيضًا إذا كان الطرف الآخر للزنبرك مثبتًا تثبيتًا جيدًا يمنعه من الحركـة ، فإن هـذا الطرف سيكون عقدة كذلك ، وتمثـل الحركـة الرنينيـة للزنـبرك عندئـذ بالمنحنيـات الموضحـة بـالشكل 14–20 . تذكر أن هذه المنحنيات لا توضح الشكل الحقيقى للموجة الطولية علـى الزنـبرك . (وعـلى العكس من ذلك ، تـوضح هـذه المنحنيات بالفعل الشكل الموجى الحقيقى فى حالة الموجات المستعرضة) . ولكنها توضح إزاحة كل نقطـة علـى الزنـبرك عـن موضـع اتزانها ، ومن الواضح أن هذه الإزاحات فى اتجاه المحور x تتغير تغيرًا جيبيًا مـع x . وتوجد العقد عند تلك النقط التى تتلاشى فيها الموجـة المتحركـة إلى اليمين مـع الموجـة المتحركة إلى اليسار ، تاركتين الزنبرك بدون انضغاط أو امتداد . وتتحقق شـروط حـدوث الموجة المستقرة عندما يكون طول الزنـبرك مسـاويًا أضعافًا صحيحـة قـدر المسـافة بـين عقدتين متتاليتين . وعليه فإن شرط الرنين فى حالة الموجات الطولية على زنبرك مثبـت عند طرفيه هو نفس شرط الرنين فى حالة الموجات المستعرضة :

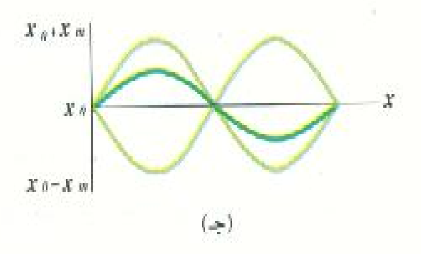
$$n\frac{\lambda_n}{2} = L$$

حيث $n = 1, 2, 3, \ldots$. وباستخدام هذه العلاقة جنبًا إلى جنب مع العلاقة بين الطول

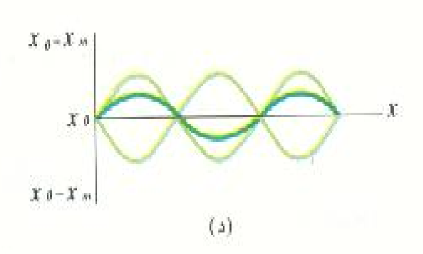


(أ)

(ب)



(جـ)



(د)

شكل 14–20:
الموجات المستقرة الناتجة عن الاهـتزاز الطولى لزنبرك . هذه المنحنيـات تصـف المسافات بين كل حلقتين متجاورتين كمـا فى الشكل 14–19 ، ولكنها لا تمثل الشكل الحقيقى للزنبرك .

الموجي والتردد ، $\lambda = v/f$ ، يمكننا أن نرى مباشرة أن الترددات الرنينية للزنبرك (أي الترددات التوافقية) تكون كالتالي :

$$f_n = n\frac{v}{2L}$$

حيث $n = 1, 2, 3, \ldots$.

14-6 :

يرن زنبرك طوله 300 cm في ثلاث قطع (كل منها بين عقدتين) عندما يكون التردد الحافز 20.0 Hz . ما هي سرعة انتشار الموجة في الزنبرك ؟

استدلال منطقي :

سؤال : كيف يمكن استنتاج سرعة الموجة من وصف الموجة ؟

الإجابة : العلاقة $v = f\lambda$ صحيحة هنا كما هي صحيحة لجميع الموجات ، كما أننا نعلم أن تردد الموجة هو نفس التردد الحافز .

سؤال : ما هو الطول الموجي في حالتنا هذه ؟

الإجابة : اهتزاز الزنبرك في ثلاث قطع يعني أن طول الزنبرك يساوي ثلاثة أمثال نصف الطول الموجي .

الحل والمناقشة : يمكن حساب الطول الموجي من العلاقة $L = 3(\lambda/2)$. إذن :

$$\lambda = \frac{2L}{3} = \frac{600\ \text{cm}}{3} = 200\ \text{cm} = 2.00\ \text{m}$$

وعليه ، بوضع $f = 20.0\ \text{Hz} = 20.0\ \text{s}^{-1}$ نجد أن :

$$v = f\lambda = (20.0\ \text{s}^{-1})(2.00\ \text{m}) = 40.0\ \text{m/s}$$

كان بإمكاننا طبعًا الحصول على نفس النتيجة بالتعويض عن $n = 3$ ببساطة في العلاقة السابق استنتاجها . ومع ذلك فإن معظم الفيزيائيين لا يفضلون حفظ معادلات مختلفة للمواقف المختلفة . ذلك أنهم يستخدمون عادة عدد أنصاف الطول الموجي على الزنبرك كله لإيجاد λ ثم العلاقة $f = v/\lambda$ لإيجاد المجهول . وفي الحقيقة فإن الأغلبية العظمى من مواقف الرنين التي سنتعامل معها يمكن وصفها باستخدام هذه العلاقة وتحليل النظام الرنيني ؛ وعليه فلن يكون من الضروري علينا أن نحفظ معادلة لكل حالة على حدة .

تمرين : ما هي السرعة الموجية عندما تهتز الموجة بنفس التردد ولكن في خمس قطع ؟

الإجابة : 24.0 m/s .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف أو شرح (أ) سعة ودورة وتردد الاهتزاز ، (ب) الـهرتز ، (جـ) ثابت الزنبرك ، (د) الحركة التوافقية البسيطة ، (هـ) الحركة الجيبية ، (و) المضاءلة (أو التخميد) ، (ز) الرنين ، (ح) الموجة الجيبية ، (ط) الطول الموجى ، (ى) قمة الموجة وقاع الموجة ، (ك) سعة ودورة وتردد الموجة ، (ل) العقدة والبطن ، (م) الموجة المستقرة ، (ن) الرنين الموجى ، (س) العلاقة بين طول القطعة و λ ، (ع) الموجة المستعرضة ، (ف) الموجة الطولية ، (ص) التوافقية .

2 ـ استخدام اعتبارات الطاقة لإيجاد سرعة متذبذب يتحرك حركة توافقية بسيطة فى أى نقطة على مساره . ذكر الوضع المناظر لكل من السرعة العظمى والصغرى .

3 ـ استخدام قانون نيوتن الثانى لإيجاد عجلة متذبذب يتحرك حركة توافقية بسيطة عند أى نقطة فى مساره . ذكر الوضع المناظر لكل من العجلة العظمى والصغرى .

4 ـ شرح كيف يمكن التحقق مما إذا كانت حركة معينة هى حركة توافقية بسيطة أم لا ، وما علاقة طريقة اختبار ذلك بقانون هوك .

5 ـ شرح كيف تعطينا الحركة على دائرة إسناد وصفًا للحركة التوافقية البسيطة .

6 ـ إيجاد التردد الطبيعى لاهتزاز (أ) نظام الزنبرك والكتلة ، (ب) البندول إذا أعطيت البيانات الكافية .

7 ـ شرح لماذا تسمى الحركة التوافقية البسيطة حركة جيبية . كتابة معادلة الحركة الجيبية وشرح الكميات المستخدمة فيها .

8 ـ توضيح من أين تنشأ قوة الاستعادة فى حالة البندول البسيط وشرح لماذا تعتبر هذه الحركة حركة توافقية بسيطة بالتقريب فقط . كتابة معادلة دورة الحركة .

9 ـ رسم عدد من أشكال الموجة المستقرة فى حالة زنبرك مثبت من طرفيه . استخدام الشكل الموجى للموجة المستقرة لحساب v أو f بمعلومية طول الوتر وأى من f أو v .

10 ـ رسم الشكل الموجى لموجة طولية مستقرة فى حالة رنين زنبرك مثبت من طرفيه .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

وحدة التردد :

$$1 \text{ hertz (Hz)} = 1 \text{ cycle/second} = 1 \text{ s}^{-1}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

التردد (f)

التردد f هو عدد دورات الاهتزاز التى تحدث فى وحدة الزمن . وإذا كان الزمن مقيسًا بالثوانى تكون وحدة f هى Hz .

الدورة (T)

الدورة T هى الزمن الذى يستغرقه النظام المهتز فى عمل دورة كاملة واحدة . والدورة تساوى مقلوب التردد : $T = 1/f$.

سعة الحركة الدورية

السعة هى أقصى إزاحة للنظام عن موضع اتزانه .

الحركة التوافقية البسيطة (SHM)

تحدث الحركة التوافقية البسيطة عندما يتحرك النظام استجابة لقوة استعادة تتناسب خطيًا مع مقدار إزاحة النظام عن موضع الاتزان : $\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$.

تردد الاهتزاز في SHM

تردد الاهتزاز في SHM هو :

$$f = \frac{1}{2\pi} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

حيث k ثابت القوة التى تميل إلى إعادة النظام إلى موضع اتزانه ، m كتلة الجسم المهتز .

الصورة الرياضية للحركة التوافقية البسيطة : الحركة الجيبية

يعتمد موضع الجسم المتحرك SHM على الزمن طبقًا للمعادلة :

$$x = x_0 \cos(\omega t) = x_0 \cos(2\pi f t) = x_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right)$$

حيث x_0 هى السعة ، f التردد (مقاسًا بالهرتز Hz) ، ω السرعة الزاوية (مقاسة بالوحدات rad/s) ، τ الدورة (مقاسة بالثانية s) . معادلتا السرعة والعجلة كدالة فى الزمن هما :

$$v = -(2\pi f x_0)\sin(2\pi f t)$$

$$a = -(2\pi f)^2 x_0 \cos(2\pi f t)$$

خلاصة :

1 ـ لاحظ أن $2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ، حيث k ثابت القوة للنظام ، m كتلة الجسم المهتز .

2 ـ عند أية لحظة زمنية t تسمى الكمية $\omega t = 2\pi f t = 2\pi t/\tau$ بطور الحركة ، وهى تعرفنا فى أى جزء من الدورة يوجد النظام فى تلك اللحظة . الطور يقاس بالزوايا نصف القطرية . تتكون الدورة الواحدة من 2π rad .

3 ـ العلاقات السابقة تنطبق على نظام تم تحريره من موضع السعة عند $t = 0$.

البندول البسيط

عندما تكون زاوية التأرجح صغيرة يتحرك البندول البسيط SHM يعطى ترددها بالعلاقة :

$$f = \frac{1}{2\pi} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

خلاصة :

1 ـ هذه العلاقة تكون صحيحة لثلاثة أرقام معنوية على الأقل للزوايا التى تقل عن 10° تقريبًا .

المصطلحات الفنية للموجات

السرعة الموجية v هى السرعة التى تنتقل بها نبضة موجية فى الوسط الحامل للموجة . الطول الموجى λ هو المسافة بين نقطتين على الموجة لهما نفس الطور .

العلاقة الآتية صحيحة لجميع الموجات :

$$v = f\lambda$$

حيث f تردد الاهتزاز .

خلاصة :

1 ـ تتعين السرعة الموجية بخواص الوسط ، ويتعين التردد بتردد مصدر الموجة . وهاتان الكميتان تحددان بالتالي الطول الموجي .

2 ـ السرعة الموجية في حالة الموجات على وتر تعطى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{\text{الشد}}{\text{الكتلة لوحدة الطول}}} \qquad (18\text{–}14)$$

انعكاس الموجات

تنعكس الموجة عند الطرف الثابت للوسط الحامل لها مقلوبة بالنسبة للموجة الأصلية . تنعكس الموجة عند الطرف الحر للوسط معتدلة .

خلاصة :

1 ـ الموجة المنعكسة تماثل الموجة الساقطة تمامًا بعد أن يتغير طورها بمقدار نصف دورة (π rad) .

مبدأ التراكب

إذا وقعت نقطة تحت تأثير موجتين أو أكثر في نفس الوقت فإن إزاحتها المحصلة تساوى المجموع الاتجاهي لإزاحات الموجات المنفردة .

الموجات المستقرة على وتر

في حالة الوتر المثبت من طرفيه تحدث الموجات المستقرة (الرنينية) عندما يساوى طول الوتر عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجي :

$$L = n\,\frac{\lambda_n}{2}$$

خلاصة :

1 ـ حيث أن السرعة الموجية واحدة لجميع الترددات في نفس الوسط ، تعطى الترددات الرنينية بالعلاقة :

$$f_n = v/\lambda_n = n\,\frac{v}{2L}$$

2 ـ الترددات الرنينية مثال ماكروئى لتكممة كمية فيزيائية ، بمعنى أن f لا يمكنه أن يأخذ جميع القيم بلا ضابط ، بل يمكنه أن يأخذ قيمًا محددة فقط تساوى مضاعفات صحيحة لكمية أساسية معينة . والتردد الأساسي في هذه الحالة هو $f_1 = v/2L$.

الموجات المستعرضة والطولية

الموجات المستعرضة هي تلك الموجات التي يتحرك فيها الوسط في اتجاه عمودى على اتجاه انتشار الموجة .

الموجات الطولية هي تلك الموجات التي يتحرك فيها الوسط في نفس اتجاه انتشار الموجة .

أسئلة وتخمينات

1 ـ ارسم رسمًا بيانيًا تخطيطيًا يمثل تغير كل من (أ) طاقة حركة كرة بندول ، (ب) طاقة وضعها ، (جـ) طاقتها الكلية مع الموضع ممثلا على نفس المحور الأفقي .

2 ـ ارسم رسمًا بيانيًا تخطيطيًا يمثل تغير كل من (أ) سرعة حركة الكتلة في نظام الزنبرك والكتلة ، (ب) عجلتها مع الموضع ممثلاً على نفس المحور الأفقي .

3 ـ علقت كتلتان متساويتان في الوزن معًا في طرف نفس الزنبرك ، ثم وضع النظام في حالة اهتزاز . ماذا يحدث لسعة الحركة الاهتزازية لطرف الزنبرك وترددها وسرعتها القصوى إذا وقعت إحدى الكتلتين (أ) عندما كان امتداد الزنبرك في نهايته العظمى ؟ (ب) عند مرور الكتلة بموضع الاتزان ؟

4 ـ تقول طالبة مبكرة النضج عقليا إنها تستطيع التنبؤ بتردد نظام الزنبرك والكتلة حتى إذا لم تعلم ثابت الزنبرك أو الكتلة ، وتقول إن كل ما تحتاج أن تعرفه هو مقدار امتداد الزنبرك عند تعليق كتلة في طرفه . هل تراهن بنقودك أنها لن تستطيع ذلك ؟

5 ـ كيف تتغير دورة بندول ما عند وجود هذا البندول في مصعد متسارع ؟ ادرس حالتي التسارع إلى أعلى وإلى أسفل .

6 ـ كيف يمكن حساب التردد الرنيني لسيارة إلى أعلى وإلى أسفل بمعلومية مقدار انخفاض السيارة عند زيادة الحمل بها ؟ قدر قيمة هذا التردد في حالة أوتوموبيل . متى يمكن أن يكون ذلك هامًا ؟

7 ـ تهتز غسالة الملابس الأوتوماتيكية أحيانًا بشدة أثناء دورة التجفيف . لماذا ؟ هل عدم اتزان الحمل هو كل القصة ؟ ماذا يجب أن يفعل مصمم الغسالة لتقليل هذه المشكلة إلى الحد الأدنى ؟

8 ـ قيمة g على القمر سدس قيمتها على الأرض . كيف يتغير تردد اهتزاز كل من الأنظمة الآتية إذا نقل من الأرض إلى القمر : (أ) نظام زنبرك وكتلة أفقي ؟ ، (ب) نظام زنبرك وكتلة رأسي ؟ ، (جـ) بندول بسيط ؟ كيف يكون سلوك كل نظام في سفينة فضاء تدور حول الأرض ؟

9 ـ تتحرك النبضتان الموجيتان المثاليتان الموضحتان بالشكل م 14-1 على وتر بسرعة قدرها 20 m/s . بين بالرسم شكل الوتر بعد مرور 0.40 s . كرر ذلك بعد مرور 0.20 s .

شكل م 14-1

10 ـ هل يمكن أن تؤدي موجتان متماثلتان تتحركان في نفس الاتجاه على وتر واحد إلى تكوين موجة مستقرة ؟

11 ـ إذا راقبت أشخاصًا يحاولون حمل حوض ملئ بالماء ستلاحظ أن بعضهم يفعل ذلك بنجاح كبير ، ولكن يلاحظ مع آخرين أن الماء يهتز بشدة في الإناء بالرغم من حرصهم الشديد . ما السبب في ذلك ؟

مسائل

القسمان 1-14 و 2-14

1 ـ علقت كتلة في طرف زنبرك رأسي فوجد أنها ترتفع بمقدار 45 cm عن الأرضية في حالة الاتزان . وعندما شدت الكتلة إلى أسفل مسافة قدرها 9.6 cm ثم تركت حرة ، لوحظ أنها تصل إلى أكثر النقط انخفاضًا في مسارها 19 مرة في أول 97.3 s بعد تحريرها . ما قيمة (أ) تردد الحركة ؟ (ب) دورة الحركة ؟ (جـ) سعة الحركة ؟

2 ـ أزيح بندول جانبًا بزاوية صغيرة بالنسبة للموضع الرأسي ثم ترك حرًا ، فتأرجح البندول بين نقطتين تفصلهما مسافة قدرها 8.75 cm . ويستغرق هذا البندول زمنًا قدره 268 s للوصول إلى نقطة بداية الحركة للمرة الستين بعد تحريره . ما قيمة كل من (أ) تردد الحركة ؟ (ب) دورة الحركة ؟ (ب) سعة الحركة ؟

3 ـ يتمدد زنبرك معين يتبع قانون هوك بمقدار 42 cm عند تعليق حمل قدره 0.28 N في طرفه . ما مقدار طاقة الجهد المختزنة في الزنبرك عند انضغاطه بمقدار 3.35 cm ؟

4 ـ يتبع زنبرك بندقية الأطفال الهوائية قانون هوك ، ويتطلب قوة قدرها 300 N لضغطه مسافة قدرها 12.5 cm عند موضع التعمير . ما مقدار طاقة الجهد المختزنة في الزنبرك عند موضع التعمير ؟

5 ـ ثبتت كتلة قدرها 250 g فى طرف زنبرك معين ثابت الزنبرك له k = 120 N/m ثم أطيل الزنبرك بمقدار 5.0 cm من موضع الاتزان وترك حرًا . أوجد (أ) سرعة الكتلة عند مرورها بموضع الاتزان ، (ب) عجلة الكتلة بعد تحريرها مباشرة .

6 ـ ينزلق نظام مكون من زنبرك مهمل الوزن وكتلة قدرها 75 g على سطح أفقى لا احتكاكى . سلطت قوة أفقية قدرها 0.66 N على الزنبرك فسببت امتداده بمقدار 7.8 cm . أوجد (أ) سرعة الكتلة عند مرورها بموضع الاتزان ، (ب) عجلتها لحظة تحريرها .

7 ـ إذا كان ثابت الزنبرك بالنسبة لزنبرك فى بندقية أطفال هوائية 1650 N/m وكان الزنبرك منضغطا مسافة قدرها 9.0 cm فى حالة التعمير ، فما أقصى سرعة تنطلق بها طلقة كتلتها 22 g من البندقية ؟

القسمان 3-14 و 4-14

8 ـ تتذبذب كتلة مقدارها 3.5 kg فى حركة توافقية بسيطة فى طرف زنبرك . فإذا كانت سعة الحركة 40 cm وثابت الزنبرك 150 N/m ، أوجد سرعة وعجلة الكتلة عندما تكون إزاحتها (أ) 40 cm ، (ب) 0 cm ، (جـ) 20 cm .

9 ـ استخدمت كتلة مقدارها 450 g فى نظام الزنبرك والكتلة فوجد أن سرعتها القصوى 21 cm/s أثناء اهتزازها بسعة قدرها 4.2 cm . أوجد (أ) ثابت الزنبرك ، (ب) أقصى عجلة للكتلة ، (جـ) سرعة وعجلة الكتلة عندما تكون على بعد 3.0 cm من موضع الاتزان .

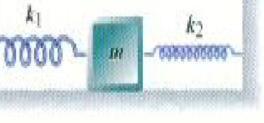
■ 10 ـ رسمت دائرة نصف قطرها 26 cm فى مركز ملعب لكرة القدم وقامت فتاة بالعدو على محيط الدائرة بسرعة ثابتة المقدار قيمتها 3.75 m/s . وفى نفس الوقت قام فتى بالجرى غدوًا ورواحًا على الخط الجانبى للملعب بحيث تتساوى سرعته دائمًا مع سرعة الفتاة فى ذلك الاتجاه . أوجد (أ) تردد حركة الفتى ، (ب) عجلة الفتى عند نقطتى نهاية حركته ، (جـ) أقصى سرعة للفتى .

■ 11 ـ يدور قمر صناعى حول الأرض بسرعة مقدارها 3100 m/s فى مدار يمر بالقطبين الشمالى والجنوبى ونصف قطره 4.2×10^7 m . اعتبر نقطة تتحرك على استقامة المحور الشمالى الجنوبى للأرض ويمر بمركزها بحيث تتساوى سرعتها دائمًا مع مركبة سرعة حركة القمر الصناعى فى الاتجاه الشمالى الجنوبى . أوجد (أ) تردد حركة النقطة ، (ب) عجلة النقطة عند نقطتى نهاية الحركة ، (جـ) سرعتها القصوى .

12 ـ عند تعليق كتلة قدرها 160 g فى طرف زنبرك وجد أن النظام يهتز بحيث يتم 33 دورة كاملة فى 80.5 s . ما قيمة ثابت الزنبرك ؟

13 ـ لاحظ طفلان داخل سيارة أنهما يستطيعان هز السيارة إلى أعلى وإلى أسفل بمقدار 12 دورة فى زمن قدره 19.5 s . (أ) أوجد ثابت الزنبرك لنظام تعليق السيارة بفرض أن كتلتها 1450 kg . (ب) إذا كانت الكتلة الكلية للطفلين 45 kg ، فبأى قدر يرتفع مستوى السيارة عندما يخرج الطفلان منها ؟

■ 14 ـ يستقر قالب كتلته 0.85 kg على سطح أفقى لا احتكاكى ويتصل بحائطين عن طريق زنبركين ثابتاهما k_1 و k_2 ، وهذا مبين بالشكل م 2-14 . فإذا كان k_1 = 44 N/m ، k_2 = 34 N/m ، فبأى تردد يهتز القالب بعد إزاحته قليلاً عن موضع الاتزان ثم تركه حرًا .



شكل م 2-14

■ 15 ـ علقت كتلة مقدارها m فى طرف سلك طوله L ومساحة مقطعه A ومعامل يونج له Y . أثبت أن الكتلة يمكن أن تهتز إلى أعلى وإلى أسفل بتردد قدره $f = (1/2\pi)\sqrt{AY/Lm}$.

القسم 5-14

■ 16 ـ تهتز كتلة مثبتة فى طرف زنبرك ذهابًا وإيابًا بحيث تعطى إزاحتها فى أى لحظة بالمعادلة $x = 18 \sin (3.7\,t)$ cm . أوجد (أ) سعة الحركة ، (ب) تردد الحركة ، (جـ) دورة الحركة ، (د) وإذا كانت الكتلة تساوى 520 g ، فما قيمة ثابت الزنبرك ؟

■ 17 ـ تهتز كتلة قدرها 165 g مثبتة في طرف زنبرك إلى أعلى وإلى أسفل طبقًا للمعادلة $y = 9.4 \sin (6.8t)$ cm . أوجد (أ) ثابت الزنبرك ، (ب) سعة الحركة ، تردد الحركة ، (د) دورة الحركة .

18 ـ اكتب الوصف الرياضي لوضع الكتلة في المسألة 5 كدالة في الزمن ، أي اكتب العلاقة $x(t)$ ، استخدم الوحدات SI .

■ 19 ـ شدت كتلة مقدارها 0.88 kg مثبتة في طرف زنبرك مسافة قدرها 2.95 cm من موضع الاتزان في الاتجاه الموجب للمحور x ثم حررت من السكون ، فإن علمت أن ثابت الزنبرك المستخدم $k = 40$ N/m ، (أ) اكتب معادلة الموضع كدالة في الزمن $x(t)$ والسرعة كدالة في الزمن $v(t)$. (ب) أوجد قيمة كل من x و v عند اللحظات $t = 0.5$ s, 1.0 s, 2.0 s . (جـ) أوجد قيمة t عندما تصل الكتلة إلى نقطة بداية الحركة لثالث مرة بعد تحريرها . (جـ) أوجد الزمن اللازم لوصول الكتلة إلى الموضع $x = -1.50$ cm لأول مرة .

القسم 6-14

20 ـ ما طول بندول زمنه الدوري 2.0 s (أ) على الأرض ؟ ، (ب) على القمر ؟ وزن أي جسم على القمر يساوي سدس وزنه على الأرض .

21 ـ بندولان تردد أحدهما ثلاثة أمثال تردد الآخر ، أي $f_1 = 3 f_2$. ما هي النسبة بين طوليهما ، L_1/L_2 .

■ 22 ـ أزيح بندول جانبًا بزاوية معينة ثم ترك حرًا ، وعندما مرت الكرة بأسفل نقطة في قوس مسارها كان الشد في الخيط ضعف وزن الكرة . إثبت أن زاوية الإزاحة الأصلية $60°$.

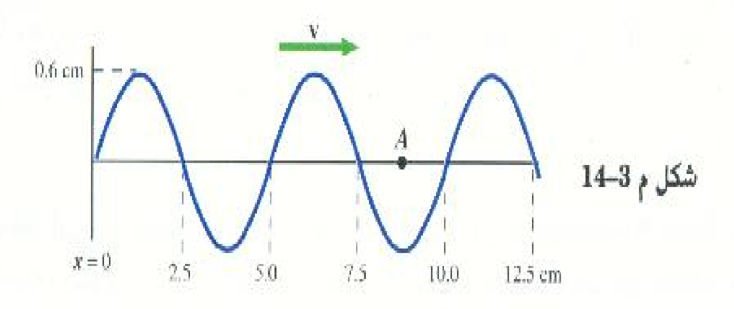
23 ـ يصنع بندول طوله 99.2 cm عددًا قدره 499.0 من الذبذبات في زمن قدره 1000 s عند مستوى سطح البحر بالقطب الشمالي ، ويصنع نفس البندول 500.5 ذبذبة خلال 1000 s عندما يوجد على مستوى سطح البحر عند خط الاستواء . احسب قيمتي g عند القطب الشمالي وعند خط الاستواء .

24 ـ تصادف أن وجدت نفسك على كوكب حليف وأردت ، من بين أشياء أخرى ، أن تعلم شدة الجاذبية عل هذا الكوكب . ولأنك طالب فيزياء ذكي قررت استخدام بندول بسيط طوله 1.0 m فوجدت أن كل 100 ذبذبة تستغرق 178 s . فإذا كان وزنك على الأرض 635 N ، فما هو وزنك على هذا الكوكب ؟

■ 25 ـ زنبرك خفيف طوله الطبيعي 30.5 cm . علقت كتلة قدرها 300 g في الزنبرك ثم استعمل هذا الزنبرك المتد بالكتلة المعلقة فيه كبندول بسيط صغير السعة ، فوجد أن دورة هذا البندول 1.45 s . بفرض أن $g = 9.80$ m/s^2 ، أوجد ثابت الزنبرك المستخدم .

الأقسام من 8-14 إلى 10-14

26 ـ تتحرك الموجة الموضحة بالشكل م 3-14 على وتر إلى اليمين بسرعة مقدارها 25 cm/s . أوجد (أ) الطول الموجي لهذه الموجة ، (ب) سعتها ، (جـ) ترددها ، (د) دورتها .



شكل م 3-14

27 ـ عندما تمر الموجة بالنقطة A في الشكل م 14-3 يهتز الوتر تبعًا للعلاقة $y = y_0 \sin (2\pi ft)$. ما قيمة كل من y_0 و f إذا كانت سرعة الموجة 38 cm/s ؟

28 ـ تنتقل كل موجات الراديو (الموجات اللاسلكية) في الهواء بسرعة مقدارها 3×10^8 m/s . ما قيمة الطول الموجي لموجة نموذجية تبثها محطة إرسال بتردد قدره 1450 Hz ؟

29 ـ تتحرك موجات الضوء في الهواء بسرعة مقدارها 3×10^8 m/s . فإذا كان الطول الموجي للضوء الأخضر حوالى 520 nm ، فما تردد هذه الموجات ؟

30 ـ ارجع إلى الشكل م 14-1 وارسم شكلاً يمثل الموقف بعد 2.2 s .

31 ـ ما هو الزمن اللازم لكي تعود كل من النبضتين الموضحتين بالشكل م 14-1 إلى نفس موضعها ؟

32 ـ ما مقدار الكتلة اللازم تعليقها في طرف خيط طوله 175 cm حتى تكون سرعة الموجات المستعرضة على الخيط 46.5 m/s ؟ كتلة كل 5 m من الخيط تساوي 0.855 g .

33 ـ حبل مشدود بين قائمتين المسافة بينهما 34 m ، وكتلة المتر الطولي منه 55 g . أعطى الحبل نبضة مستعرضة عند منتصفه فاستغرقت زمنًا قدره 0.37 s في الوصول إلى كل من طرفيه . ما مقدار الشد في الحبل .

34 ـ استخدم مهتز تردده 180 Hz في تكوين نسق موجي مستقر مكون من ثلاث قطع على وتر مشدود طوله 2.20 m . (أ) ما هو الطول الموجي للموجات ؟ (ب) ما هي سرعة هذه الموجات ؟

35 ـ إذا كانت كتلة وحدة الطول من الوتر المذكور بالمسألة 34 تساوي 1.70 g/m ، فما هو الشد اللازم في الوتر لكي نحصل على النسق الموجي السابق وصفه ؟

■ 36 ـ ما قيمة الشد اللازم لتكوين نسق موجي مكون من 4 عروات على الوتر المذكور بالمسألتين 34 و 35 ؟

■ 37 ـ لوحظ أن سلكًا مشدودًا بين قائمين يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قدرها 12.5 m يهتز تحت تأثير الريح مع تكون عقدة بالمنتصف (توجد بالطبع عقدتان أيضًا عند طرفي السلك) . وكان تردد الصوت الناتج عن السلك المهتز بهذا الشكل 43 Hz . فإذا علمت أن الكثافة الطولية للسلك 4.5 g/m ، فما مقدار الشد في السلك ؟

38 ـ يرن وتر معين مثبت من طرفيه بتردد أساسي قدره 256 Hz . ما هي الترددات الرنينية الأعلى الثلاثة التالية ؟

39 ـ يرن وتر معين في ثلاث قطع بتردد قدره 145 Hz . اكتب قيمة أربعة ترددات رنينية أخرى لهذا الوتر .

■ 40 ـ وتر أحد تردداته الرنينية 760 Hz وتردده الرنيني الأعلى التالي 950 Hz . ما هو التردد الرنيني الأساسي للوتر ؟

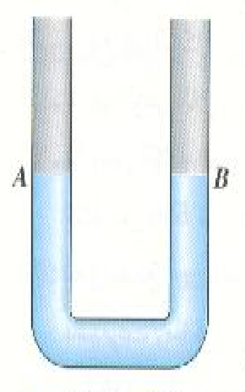
■ 41 ـ تغير عازفة الكمان طبقة الصوت الصادر من وتر بتحريك إصبعها على الوتر ، مغيرة بذلك موضع إحدى العقد الطرفية للوتر . (أ) إذا كان التردد الأساسي للوتر الحر 440 Hz ، فما هو التردد الأساسي الناتج عندما تضع العازفة إصبعها على بعد قدره خمس طول الوتر من طرفه العلوي ؟ (ب) أين يجب أن تضع العازفة إصبعها ليصبح التردد الأساسي 1100 Hz ؟

42 ـ وضع زنبرك ممتد إلى طول قدره 3.60 m في حالة اهتزاز طولي باستخدام مذبذب عند أحد طرفيه . وعندما كان التردد الحافز 4.5 Hz اهتز الزنبرك اهتزازًا رنينيًا بحيث تكونت عليه خمس عقد (بما فيها عقدتين عند الطرفين) . ما هي سرعة الموجات الطولية ؟

■ 43 ـ وصل مهتز مستعرض صغير إلى أحد طرفي وتر أفقي كثافته الطولية 0.65 g/m ويتحرك بسعة صغيرة بدرجة كافية لاعتبار هذا الطرف عقدة للأنساق الموجية المستقرة . ويمر الوتر على بكرة تبعد 1.80 m عن المهتز . فإذا علقت في الطرف الحر للوتر بعد مروره على البكرة كتل مختلفة ، فما هي الكتلة اللازمة للحصول على رنين يقسم الوتر إلى (أ) أربع عروات ؟ (ب) خمس عروات ؟ (جـ) ست عروات ؟

مسائل عامة

■ 44 ـ يتحرك كباس رأسى حركة توافقية بسيطة سعتها 21.5 cm وترددها f ، ويحمل الكباس حلقة معدنية حرة على سطحه العلوى . وعند الترددات المنخفضة للكباس تتحرك الحلقة المعدنية معه إلى أعلى وإلى أسفل . ولكن عند الترددات العالية جدًا يلاحظ أن الحلقة المعدنية تطفو لحظيًا فوق الكباس عندما يبدأ الحركة إلى أسفل . (أ) ما هى العجلة القصوى للكباس عندما تبدأ الحلقة المعدنية فى الانفصال عنه ؟ (ب) ما هو أقل تردد يحدث عنده هذا الانفصال ؟

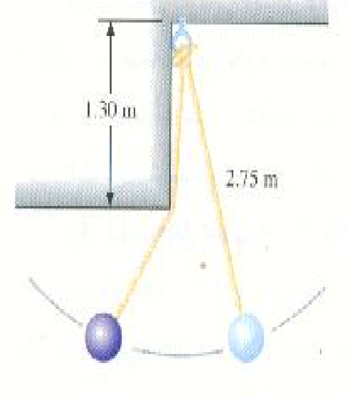


شكل م 4–14

■ 45 ـ ثبتت كتلة فى طرف زنبرك منضغط ثم غمرت المجموعة فى إناء من الماء درجة حرارته 9.500°C . وبعد تحرير الزنبرك بدأت الكتلة فى الاهتزاز ذهابًا وإيابًا بسعة متناقصة نتيجة لقوى الاحتكاك (اللزوجة) . وعندما توقف النظام نهائيًا عن الاهتزاز . أصبحت درجة الحرارة 19.625°C . فإذا كان الزنبرك والكتلة والوعاء والماء مجتمعة تكافئ من الناحية الحرارية كمية من الماء كتلتها 95 g ، (أ) ما مقدار الطاقة التى كانت مختزنة فى الزنبرك ؟ (ب) إذا كان الزنبرك منضغطًا فى البداية بمقدار 5.8 cm ، فما هو ثابت الزنبرك المستخدم ؟

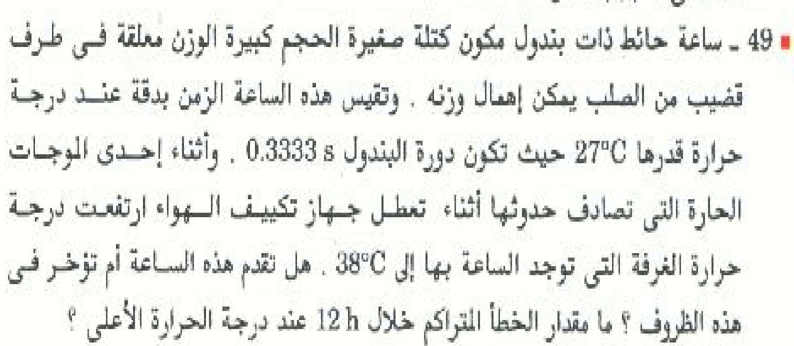
■■ 46 ـ وضعت كمية من سائل غير لزج فى أنبوبة مفتوحة الطرفين على شكل الحرف U ، وكانت المسافة الكلية من A إلى B هى L (شكل م 4–14) . نفخ شخص نفخة سريعة فى الطرف A فبدأ السائل فى التذبذب . إثبت أن السائل يتحرك حركة توافقية بسيطة ترددها $(1/\pi)\sqrt{g/2L}$.

■■ 47 ـ أوجد تردد البندول الموضح بالشكل م 5–14 فى حالة الذبذبات الصغيرة .



شكل م 5–14

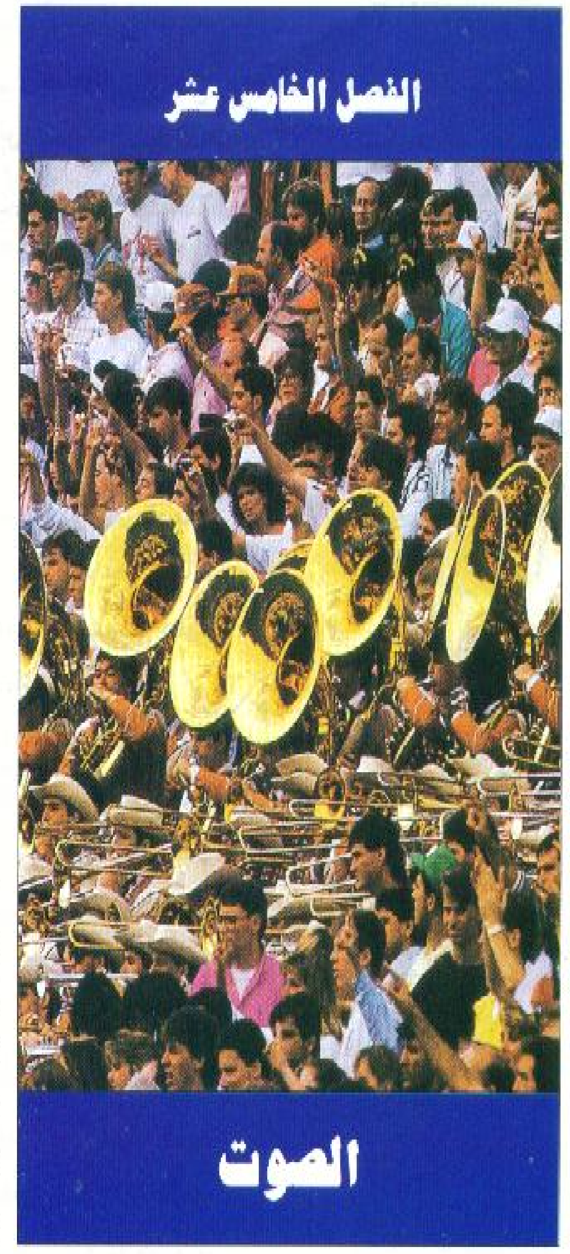
■■ 48 ـ سلكان متساويان فى مساحة المقطع ومشدودان بين نفس القائمتين ، أحدهما مصنوع من الصلب والآخر من الألمنيوم . وكان الشد T_1 فى السلك المصنوع من الصلب بحيث يتحقق رنينه بالتردد الأساسى للاهتزازات المستعرضة . ماذا يجب أن تكون قيمة الشد فى السلك المصنوع من الألمنيوم اللازم لرنينه، بدلالة T_1 ، (أ) بالتردد الأساسى ؟ (ب) بالتوافقية الثالثة ؟



■ 49 ـ ساعة حائط ذات بندول مكون كتلة صغيرة الحجم كبيرة الوزن معلقة فى طرف قضيب من الصلب يمكن إهمال وزنه . وتقيس هذه الساعة الزمن بدقة عند درجة حرارة قدرها 27°C حيث تكون دورة البندول 0.3333 s . وأثناء إحدى الموجات الحارة التى تصادف حدوثها أثناء تعطل جهاز تكييف الهواء ارتفعت درجة حرارة الغرفة التى توجد الساعة بها إلى 38°C . هل تقدم هذه الساعة أم تؤخر فى هذه الظروف ؟ ما مقدار الخطأ المتراكم خلال 12 h عند درجة الحرارة الأعلى ؟

■■ 50 ـ طوف خشبى مسطح وزنه النوعى 0.85 يطفو على سطح الماء العذب . وعندما وقف رجل كتلته 90 kg على هذا الطوف نتج عن ذلك هبوطه فى الماء بحيث أصبح سطحه العلوى فى مستوى الماء . (أ) اثبت أن قوة الطفو الإضافية المؤثرة على القالب نتبع قانون هوك . (ب) أوجد ثابت الزنبرك لهذا النظام وتردد الاهتزاز الرأسى للطوف عندما يقفز الرجل من فوقه . افترض أن التأثيرات المخمدة الناشئة عن اللزوجة يمكن إهمالها .

الفصل الخامس عشر



الصوت

سوف نقوم الآن بتطبيق مفاهيم الحركة الموجية التي ناقشناها في الفصل السابق على نوع معين من الحركة الموجية وهو الصوت . وليست دراسة الصوت مهمة في حد ذاتها فقط ، بل إنها علاوة على ذلك تزودنا بوسيلة قيمة جدًا لإثراء وتقوية معلوماتنا عن الحركة الموجية عمومًا . وسوف نجد أن كثيرًا من المبادئ والأفكار التي سنتناولها هنا بالمناقشة فيما يتعلق بالصوت لها أهمية كبيرة أيضًا في دراستنا للضوء ولأنواع أخرى من الحركة الموجية .

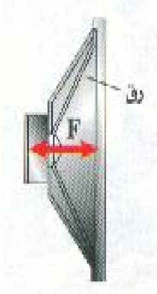
15-1 منشأ الصوت

الموجات الصوتية هي موجات طولية تنتقل في أي مادة تقريبًا ، سواء كانت هذه المادة صلبة أم سائلة أم غازية . وتنشأ هذه الموجات بواسطة أي آلية لتوليد الموجات التضاغطية في الوسط المحيط . ومن أمثلة المصادر الصوتية يمكننا أن نذكر وتر الجيتار المهتز والأحبال الصوتية المهتزة والغاز المنفجر في مفرقعة نارية . والصوت لا ينتقل في الفراغ لعدم وجود المادة التي يمكنها نقل التضاغطات الموجية . والتجربة الشهيرة لإثبات ذلك هي أننا لا نسمع صوت جرس يرن داخل غرفة مفرغة من الهواء ؛ فبالرغم من أن الجرس يهتز ، فليس هناك مادة محيطة به يمكنها أن تحمل الاهتزاز إلى آذاننا .

إن اهتمامنا ينصب أساسًا على انتشار الموجات الصوتية في الهواء لأن هذا هو أساس حاسة السمع لدينا . ومع ذلك فإن الصوت ينتقل بسرعة أكبر وفقد أقل للطاقة في

السوائل والجوامد منه في الهواء . وهذا هو السبب في أننا إذا وضعنا أذننا على قضيب السكة الحديد يمكننا بهذه الطريقة سماع صوت اقتراب القطار قبل أن نسمعه في الهواء بوقت طويل . وبالرغم من أن الصوت يعرف عادة بأنه تلك الموجات التي نستطيع سماعها بآذاننا ، فإن ترددات الصوت يمكن أن تكون أكبر كثيرًا أو أقل كثيرًا من الترددات التي تحسها الأذن ؛ وسوف نناقش الأذن البشرية كمكشاف صوتي في أقسام لاحقة بهذا الكتاب .

15-2 الموجات الصوتية في الهواء



شكل 1-15:
يؤدي اهتزاز الرق المرن للمجهار ذهابًا وإيابًا إلى انبعاث تضاغطات وتخلخلات تنتشر تباعًا في الهواء .

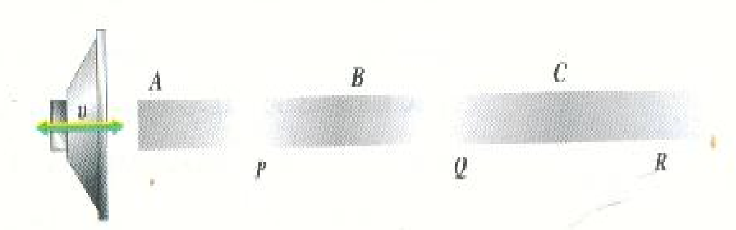
لندرس الآن عمل مجهار (مكبر صوت) يصدر صوتًا بسيطًا . يتركب المجهار البسيط من غشاء مخروطي مصنوع من مادة مرنة ، يسمى الرق ، يمكنه أن يتذبذب ذهابًا وإيابًا تحت تأثير قوة مسلطة F ، كما هو مبين بالشكل 1-15 . (سوف نتعرف على كيفية الحصول على هذه القوة عند دراسة القوى المغناطيسية في الفصل التاسع عشر) .

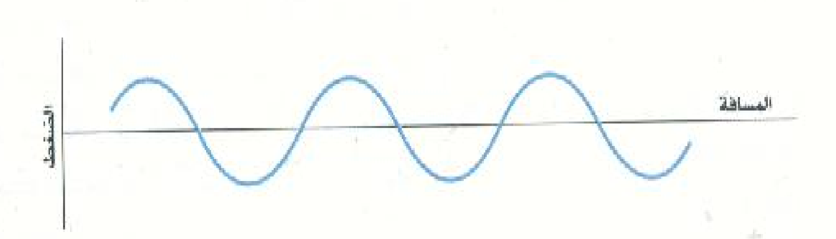
عندما يتحرك الرق بالشكل 1-15 إلى اليمين فإنه يضغط الهواء أمامه ، مكونًا بذلك تضاغطًا ينطلق في الهواء . وفي لحظة تالية يكون الرق متحركًا إلى اليسار تاركًا أمامه منطقة من الهواء ذات ضغط منخفض تسمى **التخلخل** ، وهذا الاضطراب ينطلق أيضًا بدوره من المجهار وينتشر في الهواء . وبتكرار هذه العملية مرات كثيرة تنبعث من المجهار سلسلة من الاضطرابات الضغطية ، التضاغطات والتخلخلات ، التي تنتشر متتابعة أحدهما تلو الأخرى في الهواء . ويتضح من ذلك أن هناك تشابهًا كبيرًا بين هذه الموجات الصوتية والموجات التضاغطية على زنبرك ، والتي ناقشناها تفصيلاً في الفصل السابق .

ويوضح الشكل 2-15 الموجة المنبعثة من مجهار كالسابق وصفه ، حيث A, B, C تمثل التضاغطات ، بينما تمثل P, Q, R التخلخلات . وبالإضافة إلى ذلك يمثل الشكل 2-15 أيضًا ضغط الهواء بطول هذه الموجة الصوتية في لحظة معينة ، مع ملاحظة أن الضغط على مستوى الخط الأفقي في هذا الرسم البياني هو متوسط الضغط الجوي . ومن الجدير بالذكر أن التضاغطات والتخلخلات في الموجة الصوتية تسبب تغيرات طفيفة جدًا في ضغط الهواء ، إذ أن هذه التغيرات لا تزيد عن حوالي 0.01 في المائة فقط من الضغط الجوي حتى بالنسبة للأصوات العالية جدًا .

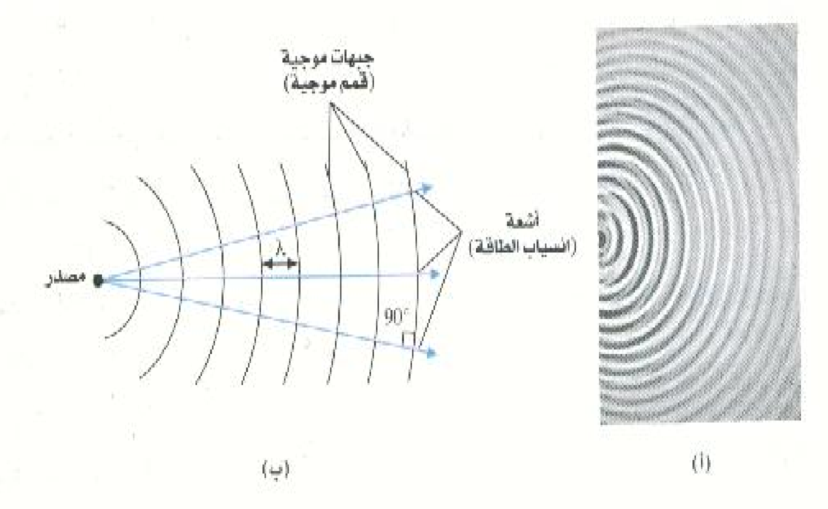
من المشاهد أن الموجات الصوتية المنبعثة من مجهار أو أي مصدر صوتي آخر لا تتقيد عادة بالسير في خط مستقيم في اتجاه واحد فقط ، ولكنها بدلاً من ذلك تنتشر من المصدر في جميع الاتجاهات . ولفهم هذه السمة من سمات الحركة الموجية يمكننا الرجوع إلى الشكل 3-15 أ الذي يمثل موجة ماء منبعثة من مصدر معين ؛ وهذا الموقف موضح تخطيطيًا أيضًا بالشكل 3-15 ب . وكما نرى من هذا الشكل فإن القمم الموجية (وتسمى هنا بالجبهات الموجية) تكون على هيئة دوائر يزداد نصف قطرها زيادة مطردة أثناء حركتها مبتعدة عن المصدر . وعندما تصل القمم الموجية إلى مسافات كبيرة

جدًا بالنسبة إلى المصدر سوف تصبح هذه الدوائر كبيرة جدًا ويكون انحناؤها صغيرًا جـدًا . ومن ثم فإذا نظرنا إلى قمم موجية تقع على بعد كبير جدًا من المصدر فإنـها ستبدو على هيئة خط مستقيم تقريبا أثناء مرورها على سطح الماء . وبناء علـى ذلـك تسـمى الموجـات البعيدة عن مصدرها **بالموجات المستوية** ، وهـو مصطلح موجـى عـام ينطبـق أيضًـا علـى الموجات ثلاثية الأبعاد كما سنرى حالا .





شكل 2-15:
تتكون الموجة الصوتية المنبعثة مـن المجهار من مناطق ذات ضغط مرتفع وأخرى ذات ضغط منخفـض علـى التوالى . وعمليًا يتغير الضغط فـى هذه المناطق بما يعـادل 0.01 فـى المائة فقط أو أقل .



شكل 3-15:
(أ) مصدر موجى يرسـل موجـات دائرية على سطح الماء . (ب) رسـم تخطيطى يسـتخدم لتمثيل الموقـف الموضح فى (أ) . (مركـز تطويـر التعليم) .

والموجات المائية الموضحة بـالشكل 3-15 تحمـل معـها الطاقـة بعيـدًا عـن المصـدر . وحيث أن الطاقة تنتقل فى اتجاه انتشار الموجة فإن الطاقة التى تحملـها تتحـرك علـى استقامة الخطوط نصف القطرية ، كالخطوط المميزة بكلمة **أشعة** فـى الشكـل . **لاحظ أن الأشعة طبقًا للتعريف عمودية على الجبهات الموجية** . وحيـث أن الجبهـات الموجيـة تتحول إلى خطوط مستقيمة تقريبًا على بعد كبير من المصدر ، ولأن الأشعة عمودية على الجبهات الموجية ، **فإن الأشعة تكون متوازيـة عندما تكـون بعيـدة جدًا عن المصدر الموجى ، أى فى الموجة المستوية .**

والموقف يشبه ذلك إلى حد كبير فى حالة الموجات الصوتية فى الـهواء . ولكن نظـرًا لأن هذه حالة ثلاثية الأبعاد ، فإن الجبهات الموجية تكون سطوحًا كروية متمركزة عنـد المصدر وليست دوائر كما فى الحالة ثنائية البعد . ويتناقص انحناء هذه **الموجات الكرويـة**

تدريجيًا كلما بعدت عن المصدر ، وتتحول إلى أسطح متساوية أساسًا على أبعاد كبيرة جدًا بالنسبة إلى المصدر الموجى ، ولذلك تسمى هذه الموجات أيضًا بالموجات المستوية . وكما في الحالة السابقة فإن الأشعة تكون عمودية على الجبهات الموجية ، ومن ثم تكون الأشعة متوازية أيضًا مع بعضها البعض في الموجات المستوية .

ويمكننا أيضًا أن نلاحظ سمة أخرى للموجات الدائرية في الشكل 3-15 أ (وللموجات الكروية أيضًا) ، وهى أن سعتها تتناقص باستمرار مع زيادة بعدها عن المصدر ، وهذا واضح من درجة التباين بين القمم والقيعان في الشكل . هذه الظاهرة تعكس حقيقة أن الطاقة التى تحملها الموجة تتوزع على جبهة موجية تزداد كبرًا بزيادة بعدها عن المصدر . وهذه الظاهرة لا تحدث في حالة انتشار الموجات على الأوتار أو الزنبركات أو القضبان لأن الطاقة كلها تنتشر في خط مستقيم ، أى في بعد واحد فقط . ولهذا السبب يمكننا القول أن الأشعة تتفرق من المصدر في حالة الموجات ثنائية البعد وثلاثية البعد . وبزيادة انفراج الأشعة بزيادة نصف قطر الجبهة الموجية سوف تتوزع الطاقة على خط أو مساحة متزايدة باستمرار . ولكن هذا النقص في الطاقة لا يحدث في حالة الموجات المستوية فقط ، وذلك لأن أشعة الموجات المستوية متوازية ومن ثم سوف تنتقل الطاقة في اتجاه واحد وبالتالى لا تقل مع حركة الموجات .

15-3 سرعة الصوت

تعلمنا في الفصل الرابع عشر أن سرعة الموجات المستعرضة على وتر مشدود تعطى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \qquad (14\text{–}18)$$

وهذه حالة خاصة من الصور العامة الآتية :

$$v = \sqrt{\frac{\text{قوة الاستعادة}}{\text{عامل القصور الذاتى}}}$$



(أ)



(ب)

تمكننا الطائرات من السفر خلال الهواء بسرعات عالية . والطائرة الموضحة في (أ) تطير بنفس سرعة الصوت تقريبًا . أما الطائرة الموضحة في (ب) فيمكنها الطيران بسرعة أعلى من سرعة الصوت .

وبناء على هذا يتوقع أن تتبع سرعة الموجات الطولية في أى وسط علاقة مشابهة . وهذا صحيح بالفعل ، فقوة الاستعادة في حالة التضاغطات والتخلخلات مرتبطة بمعامل مرونة الوسط ، كما أن عامل القصور الذاتى هو كثافة الوسط . وفي حالة الوسط أحادى

البعد ، كالسلك أو قضيب السكة الحديد ، يكون معامل المرونة المناسب هو معامل يونج Y ، أما فى حالة الأوساط ثنائية وثلاثية الأبعاد فيجب استخدام معامل المرونة الحجمية B . وعليه يمكننا كتابة التعبيرين الآتيين لسرعة الصوت :

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \tag{15-1}$$

(وللوسط أحادى البعد) ، و :

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \tag{15-2}$$

(للأوساط ثنائية وثلاثية الأبعاد) .

لنطبق الآن المعادلة (2-15) على حالة سرعة الصوت فى الغازات .

فى حالة الغازات المثالية تعتمد قيمة B على نوع العملية التى ينضغط بها الغاز فإذا كان الانضغاط أيسوثرميًا فإن معامل المرونة الحجمية B يساوى ضغط الغاز P . ولكن التضاغطات الناتجة عن مرور الموجة الصوتية خلال حجم صغير من الغاز تحدث بطريقة فجائية سريعة جدًا بحيث لا تكون هناك فرصة لحدوث أى تبادل حرارى . وعليه فإن هذه التضاغطات تكون أدياباتية . وباستعمال قانون الغاز المثالى (المعادلة 1-10) يمكننا بقليل من العمليات الرياضية البسيطة إثبات أن $B = \gamma P$ فى حالة التضاغطات الأدياباتية ، حيث $\gamma = C_p / C_v$.

إذن ، تعطى سرعة الصوت فى الغاز المثالى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma B}{\rho}} \tag{15-3}$$

ولكن قانون الغاز المثالى يعطى ضغط الغاز بدلالة درجة حرارته كالتالى :

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{m}{V}\frac{RT}{M} = \rho\frac{RT}{M}$$

حيث m كتلة n moles من الغاز ، M الكتلة الذرية أو الجزيئية للغاز . إذن ، بالتعويض عن P من هذه العلاقة فى المعادلة (3-15) نجد أن :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{15-4}$$

ومن المهم ملاحظة أن اعتماد سرعة الموجة الصوتية على كل من P و ρ طبقًا للمعادلة (3-15) قد اختفى هنا ، إذ تبين المعادلة (4-15) أن درجة حرارة الغاز هى متغير الحالة الديناميكية الحرارية الوحيد الذى تتعين به سرعة الصوت .

ويوضح الجدول 1-15 القيم النموذجية لسرعة الصوت فى بعض المواد عند 0°C . لاحظ ما ذكر فى حاشية هذا الجدول عن تغير v فى الهواء مع T .

جدول 1-15 :

سرعة الصوت* فى بعض المواد

المادة	$v(m/s)$
هواء •	331.45
أكسوجين	316
هليوم	965
هيدروجين	1284
ماء	1402
ماء (20°C)	1482
ماء (50°C)	1543
ألمنيوم	5100
نحاس	3560
حديد	5130

* هذه القيم مقاسة عند درجة 0°C مالم ينص على غير ذلك .

• تعطى سرعة الصوت فى الهواء بالقرب من درجة حرارة الغرفة بالمعادلة :

$v = 331.45 + 0.61\,T$ m/s

حيث T درجة الحرارة السيليزية .

مثال توضيحى 1-15

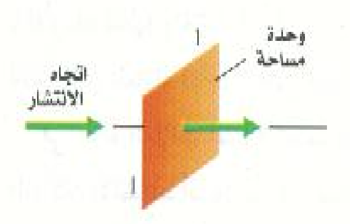
أوجد سرعة الصوت فى غاز النيون 0°C .

استدلال منطقى : يمكننا استخدام المعادلة (4-15) مع وضع $M = 20.18$ kg/kmol وحيث أن النيون غاز أحادى الذرة ، إذن $\gamma = 1.66$ (الجدول 1-12) . وعليه :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{(1.66)(8314 \text{ J/kmol.K})(273 \text{ K})}{20.18 \text{ kg/mol}}} = 432 \text{ m/s}$$

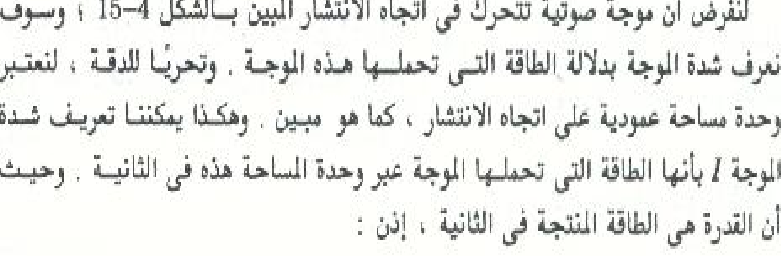
تمرين : غازان مثاليان لهما نفس الكتلة الجزيئية M ، ولكن الغاز A أحادى الذرة والغاز B ثنائى الذرة . أوجد النسبة v_A / v_B . الإجابة : 1.09

15-4 الشدة ومستوى الشدة



شكل 15-4: شدة الصوت هى كمية الطاقة المارة عبر وحدة المساحة لكل ثانية . ويجب أن تكون المساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة كما هو مبين .

رأينا فى الفصل الرابع عشر أن المصدر الذى يرسل موجة على وتر يرسل الطاقة أيضًا مع الموجة . والواقع أن جميع الموجات تحمل الطاقة معها ، وليست الموجات الصوتية استثناء من هذه القاعدة . فالمجهار المبين بالشكلين 1-15 و 2-15 ، مثلاً ، يصدر الطاقة الموجية الصوتية ، وهذه الطاقة تنتقل فى اتجاه انتشار الموجة .



لنفرض أن موجة صوتية تتحرك فى اتجاه الانتشار المبين بالشكل 4-15 ، وسوف نعرف شدة الموجة بدلالة الطاقة التى تحملها هذه الموجة . وتحريًا للدقة ، لنعتبر وحدة مساحة عمودية على اتجاه الانتشار ، كما هو مبين . وهكذا يمكننا تعريف شدة الموجة I بأنها الطاقة التى تحملها الموجة عبر وحدة المساحة هذه فى الثانية . وحيث أن القدرة هى الطاقة المنتجة فى الثانية ، إذن :

شدة الصوت هى القدرة المارة عبر وحدة مساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة .

$$I = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

ووحدات شدة الصوت فى النظام SI هى الواط لكل متر مربع ، ويوضح الجدول 2-15 شدة بعض الأصوات المألوفة مقدرة بهذه الوحدة . لاحظ أن مدى شدة الصوت الذى تستطيع الأذن أن تسمعه واسع جدًا ، وهذا يبين أن الأذن جهاز قياس صوتى مذهل الحساسية .

جدول 2-15 القيم التقريبية لشدة ومستوى شدة بعض الأصوات

نوع الصوت	الشدة (W/m^2)	مستوى الشدة (dB)
الصوت المسبب للألم	1	120
ثقابة الصخور التى تعمل بالهواء المضغوط أو ماكينة البرشمة*	10^{-2}	100
طريق كثيف المرور*	10^{-5}	700
التخاطب العادى*	10^{-6}	60
الهمس متوسط الارتفاع*	10^{-10}	20
حفيف الشجر*	10^{-11}	10
الصوت المسموع بالكاد	10^{-12}	0

* بالنسبة لشخص قريب من المصدر

ومن أهم خواص الأذن أن استجابتها لمختلف مستويات شدة الصوت تتناسب طرديًا مع **لوغاريتم I** ، بمعنى أن إحساسنا **بالجهارة** النسبية لصوتين هو (I_2/I_1) وليس مجرد I_2/I_1 . ومن ثم فإن المقياس المناسب للتعبير عن الجهارة (وتسمى **مستوى الشدة أو مستوى الصوت**) هو **مقياس الديسيبل** ، ويعرف بالعلاقة :

$$\text{مستوى الصوت بالديسيبل} \quad (\text{dB}) = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (15\text{-}5)$$

حيث I هي شدة الصوت المعطى (بالواط لكل متر مربع) ؛ I_0 ، هي غالبًا ، وليس دائمًا ، أقل شدة للصوت الذي تسمعه الأذن بالكاد وتساوي $10^{-12}\ \text{W/m}^2$. لاحظ أن مستوى شدة أقل صوت مسموع هي :

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 10 \log 1 = 0\ \text{dB}$$

وحيث أن شدة الصوت المسبب للألم $1\ \text{W/m}^2$ ، إذن مستوى شدة الصوت المسبب للألم يساوي :

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 10 \log 10^{12} = 120\ \text{dB}$$

أي أن هذا المقياس يضغط رتب العظم الاثنى عشر لشدة الصوت المسموع إلى مقياس يمتد من 0 إلى 120 dB فقط . وبينما يبين الجدول 15-2 قيم dB لمختلف مصادر الصوت التي نقابلها في حياتنا ، يبين الجدول 15-3 قيم dB المناظرة لقيم مختلفة من الشدة .

جدول 15-3 :

مقياس الديسيبل*

الشدة (W/m^2)	مستوى الشدة (dB)
10^{-12}	0
10^{-11}	10
10^{-10}	20
10^{-9}	30
.	.
.	.
.	.
10^{-1}	110
1	120
10	130

* 1 B (bel) = 10 dB ، وتسمى بل نسبة إلى الكساندر جراهام بل مخترع التليفون .

مثال توضيحي 15-2 :

أوجد مستوى الصوت بالديسيبل dB لموجة صوتية شدتها $10^{-5}\ \text{W/m}^2$.

استدلال منطقي : من المعادلة (15-5) :

$$\text{مستوى الصوت}\ (\text{dB})\ 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-15}}{10^{-12}} = 10 \log 10^7$$

$$= (10)(7) = 70\ \text{dB}$$

تمرين : أوجد مستوى الصوت المكافئ لشدة قدرها $4.0 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2$. **الإجابة :** 46 dB .

مثال 15-1 :

أوجد شدة صوت معين إذا كان مستوى شدته 35.0 dB .

استدلال منطقي :

سؤال : إلى ماذا ينسب مستوى الشدة ؟

الإجابة : المستوى المرجعى لقياس الشدة هومستوى أقل صوتمسموع ،مالم ينص على غير ذلك .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى الذى يتضمن الشدة المجهولة ؟

الإجابة : $35.0\ dB = 10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)$ حيث $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$.

سؤال : كيف تستخرج I من اللوغاريتم (log) ؟

الإجابة : بأخذ مقابل اللوغاريتم (antilog) لطرفى المعادلة بعد القسمة علـى 10 . تذكـر أن $antilog\ (\log x) = x$.

الحل والمناقشة : بقسمة طرفى المعادلـة علـى 10 نحصـل علـى $3.50 = \log\ (I/I_0)$. وبأخذ مقابل اللوغاريتم للطرفين نجد أن :

$$antilog\ (3.50) = 10^{3.50} = 3160$$

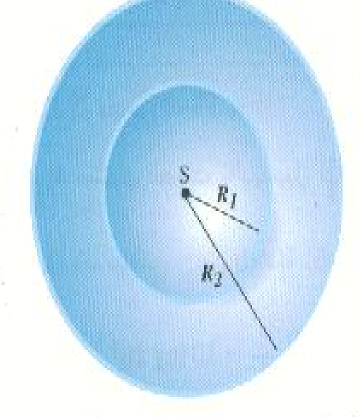
$$anitlog\left[\log\left(\frac{I}{I_0}\right)\right] = \frac{I}{I_0}$$

إذن : $\frac{I}{I_0} = 3160$ ، ومنه نحصل على :

$$I = 3160\ I_0 = 3160\ (10^{-12}\ W/m^2)\ 3.16 \times 10^{-9}\ W/m^2$$

15-5 الشدة فى حالة المصدر النقطى : (قانون التربيع العكسى)

ذكرنا فى القسم 2-15 أن سعة الموجة ، وبالتالى محتوى طاقتها ، فى ثلاثة أبعـاد يقـل عمومًا مع البعد عن المصدر . وسنقوم الآن باشتقاق تعبـير لـهذا النقص فـى الشـدة مـع المسافة عند انبعاث الموجات فى جميع الاتجاهات من مصدر نقطـى . **والمصدر النقطى** من وجهة النظر العلمية هو مصدر أبعاده صغيرة جدًا بالمقارنة بالمسافة التى تقاس عندهـا شدة الموجة .



شكل 5-15: تتوزع قدرة المصـــدر P بانتظـام علـى مساحة قدرهـــا $4\pi R_1^2$ علـى بعـد R_1 ، وعلى مساحة قدرها $4\pi R_2^2$ على بعد R_2 . إذن الشدة $= P/4\pi R^2$.

لنعتبر مصدر نقطيًا S قدرة إشعاعه للموجات الصوتية بـالواط P ، ولنتخيـل كرتـين متحدتى المركز نصف قطريهما R_1 و R_2 يقع مركزهما المشـترك عنـد المصـدر ، كمـا هـو مبين بالشكل 5-15 . وسوف نفترض فى هذا التحليل أن انبعاث الموجـات مـن المصـدر **متجانس فراغيًا** ، بمعنى أن الشدة واحدة فى جميع الاتجاهات . وعندئذ يمكننا القـول أن القدرة المنبعثة P تتوزع توزيعًا منتظمًا على سطح الكرة 1 ومساحته $A_1 = 4\pi R_1^2$.

إذن ، شدة الصوت فى أى نقطة تبعد مسافة R_1 عن المصدر تساوى :

$$I_1 = \frac{P}{4\pi R_1^2}$$

وبالمثل فإن الشدة على بعد R_2 تكون :

$$I_2 = \frac{P}{4\pi R_2^2}$$

ومن هاتين العلاقتين نجد أن النسبة بين الشدتين هى :

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

وتعرف الصيغة العامة لكيفية تغير الشدة مع المسافة بقانون التربيع العكسى :

تتناسب شدة الموجات المنبعثة انبعاثًا متجانسًا فراغيًا من مصدر نقطى تناسبًا عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر .

وإذا فرضنا أن هناك عددًا من المصادر المستقلة التى تنبعث منها الموجات فى نفس الوقت إلى مواضع مختلفة ، فإن الشدة الكلية للموجات I_{tot} فى موضع ما تساوى مجرد مجموع الشدات المنفردة $(I_1, I_2, \ldots.)$ فى ذلك الموضع :

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots\ldots.. \qquad (15\text{-}6)$$

مثال 2 - 15 :

افترض أن الصوت يصلك من بوق معين بشدة قدرها I_1 ، وأن هناك بوقًا آخر يصدر نفس كمية الطاقة الصوتية ولكنه يبعد عنك مسافة تساوى نصف بعدك عن البوق الأول . افترض كذلك أن البوقين بعيدين جدًا عن موضعك بحيث يمكن اعتبارهما مصدرين نقطيين . (أ) ما هى الشدة الكلية التى تصل إليك بدلالة I_1 عندما يعزف البوقان فى نفس الوقت ؟ (ب) ما هو مستوى الشدة (بالديسيبل) الذى تقيسه أثناء عزف البوقين معًا مقارنًا بمستوى الشدة فى حالة عزف البوق الأول منفردًا .

استدلال منطقى :

1

سؤال : ما هى النسبة بين شدتى الموجات المنبعثة من مصدرين متساوى القدرة إذا كان بعد إحداهما عنك ضعف بعد الآخر ؟

الإجابة : تتناسب الشدة تناسبًا عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر ، وفى هذه الحالة $I_2/I_1 = (2/1)^2 = 4$. إذن الشدة I_2 نتيجة للبوق الأقرب 4 أضعاف الشدة I_1 نتيجة للبوق الأبعد .

سؤال : كيف تجمع الشدتان ؟

الإجابة : الشدة الكلية طبقًا للمعادلة (6-15) هى : $I_{tot} = I_1 + I_2$.

سؤال : كيف تطبق الصيغة الرياضية لمستوى الشدة عند مقارنة مستويى صوتين شدة أحدهما لا تساوى مبدى السمع I_0 ؟

الإجابة : يمكن استخدام المعادلة (5-15) لأى قيمتين للشدة .

الحل والمناقشة :

(أ) الشدة الكلية هى :

$$I_{tot} = I_1 + 4I_1 = 5\,I_1$$

(ب) الفرق فى dB بين هذه الشدة وشدة البوق الأول وحده يساوى :

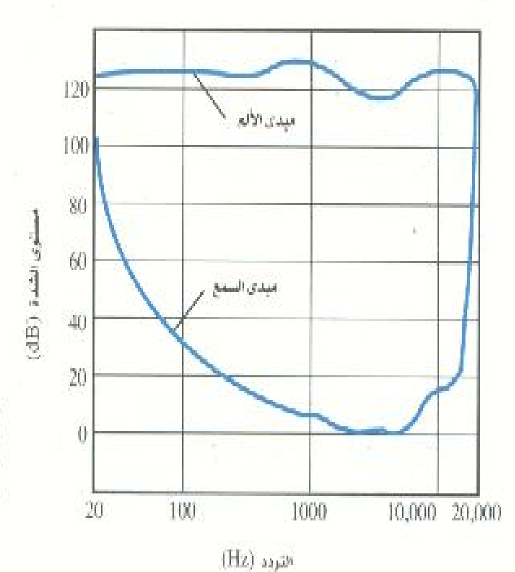
$$dB = 10\log\left(\frac{5I_1}{I_1}\right) = 10\log 5 = +7\ dB$$

تمرين : اثبت أنه كلما تضاعفت شدة الصوت مرتين يزداد مستوى الشدة بمقدار 3 dB تقريبًا . **تلميح** : لاحظ أن $\log 2 = 0.31103$.

15-6 الاستجابة الترددية للأذن

يختلف البشر فى قدرتهم على سماع الأصوات . ونحن نعلم جميعًا أن سمع بعض الناس قد يضعف لسبب من الأسباب ، وبذلك تقل حساسية آذانهم بدرجة كبيرة عن حساسية إذن الشخص ذى السمع العادى . ومع ذلك يتفق معظم الناس إلى درجة كبيرة فى شدة الصوت الذى يمكن سماعه بالكاد ، وكذلك فى جهارة الصوت المسبب للألم . ومن ثم يمكننا وضع حدود متوسطة للقدرة السمعية للأذن البشرية .

وتعتمد استجابة الأذن للصوت على تردده بالإضافة إلى شدته . فالأذن أكثر حساسية لبعض الترددات من البعض الآخر . وقد أثبتت الدراسات أن معظم الناس لا يستطيعون سماع الموجات الصوتية التى يزيد ترددها عن حوالى 20,000 Hz . وتسمى الموجات التى يزيد ترددها عن هذه القيمة **بالموجات فوق السمعية** . بمعنى الصوت « الأعلى » أو « الأكبر » من ناحية التردد . بالمثل لا يستطيع معظم الناس أن يسمعوا الأصوات التى يقل ترددها عن حوالى 20 Hz .



شكل 6-15:
تستطيع الأذن العادية سماع الأصوات التى تقع شدتها فوق المنحنى السفلى .

الفيزيائيون يعملون   توماس د . روسينج ، جامعة الينوى الشمالية

الفيزياء التطبيقية : استخدام الفيزياء في حل المشاكل



يهتم الفيزيائيون بدراسة مدى واسع جـدًا مـن الأجسـام ، ابتـداء مـن الكواركـات وانتهاء بالمجرات . ويجد الفيزيـائيون البـاحثون فـي هذيـن المجـالين ـ فيزيـائيو الجسيمات الدقيقة وعلماء الفيزياء الفلكية ـ متعة كبيرة فـي إسـهامهم فـي توسيع جبهات المعرفة الإنسانية ، ولكن بعض الفيزيائيين الآخرين يجدون متعتهم الحقيقية فى تطبيق المبادئ الفيزيائية فـى حـل المشاكل التطبيقية . وقـد كنـت أنـا واحـدًا ممـن ينـتمون إلى الفئة الأخيرة ، إذا كان الجزء الأعظم من أبحاثي فـي مجال الفيزياء التقليدية ، وهو مجال يربط بين عناصر الفيزياء والـهندسة معًا .

كان عملى الأول بعد تخرجي في شركة كبيرة من شركات الكومبيوتر ، حيـث كلفت ببحث خواص الأغشية المغناطيسية الرقيقة المقدر لـها أن تحـل محـل القلـوب الفيزيئية فى ذاكرة الكومبيوترات عالية السرعة . ومع أن الجـزء الأكـبر مـن أبحاثنـا كـان ذا أهداف عملية فى المقام الأول (كدراسة كيفية زيادة سرعة تحـول الأغشية بين الحالات المختلفة مثلاً) ، فقد أمكننى أيضًا إجراء بعض البحوث الأساسية (كالرنين الموجي المغزلى على سبيل المثال) .

وبعد انتقالى إلى مجال التدريس الجـامعي بعـد ذلـك بسـنوات قليلـة تحـول اهتمـامى إلى فيزيـاء الآلات الموسـيقية ، أى أن تخصصى البحثى قد تحول من المغناطيسية إلى الصوتيات . وخلال سنوات عديـدة قمـت مـع طلابـى بدراسـة عـدد مـن الآلات الموسيقية ، من الجيتارات إلى الأجراس ، ومن الطبـل المطـوق بالأوتـار إلى الجاميلانـات . وبتطبيـق المبـادئ الفيزيائيـة الأساسـية توصلت مجموعاتنا البحثية إلى معرفة كيف تصدر الأصوات الموسيقية من تلك الآلات ، بل تمكنا فى بعـض الحـالات مـن اقـتراح بعض الطرق لتحسين هذه الأصوات .

وقد اسـتخدمنا فـى دراسـة صوتيـات الآلات الموسـيقية تقنيـات تعتمـد علـى مجموعـة مـن المبـادئ الفيزيائيـة . فـالتداخل الـهولوجرافى مثلاً يظهر أنساق اهتزاز السطح الباعث للصوت مثل سطح الجرس الصيني . وتستخدم محولات الطاقـة البيزوكهربائيـة لقياس القوة والعجلة فى تقنية تسـمى **التحليل النسقي** بواسطة الكومبيوتـر . والواقـع أن وصـف مجـال الإشـعاع الصوتـى للآلـة الموسيقية لا يختلف كثيرًا عن وصف المجال الكهرومغناطيسى الناتج من هوائى معقد .

ويعتبر حقل الفيزياء والفنون مجالاً خصبًا وممتعًا من مجالات الدراسة . وتوجد الآن جمعية دولية صغيرة ، ولكنها مترابطـة جدًا ، من العلماء العاملين فى مجال الصوتيات الموسيقية ، وقد التقيت من خلالـها بعدد من أصدقائى المقربين . وقد قيل لى أن هذا صحيح فيما يتعلق بالفيزيائيين العاملين فى مجال تطبيق الفيزياء فى الفنون المرئية والرقـص والفنـون المسـرحية . وللأسـف الشديد فإن الحصول على الدعم المالى اللازم لـهذه الأبحاث أمر فى غاية الصعوبة . (وربما كان هذا أحد أسباب صغر جمعيتنـا السابق الإشارة إليها ، ولا يدفعنا جميعا إلى لعمل فى هذا المجال إلا حبنا للبحث فقط) .

ومنذ عهد قريب ركزت جزء من اهتمامى مرة أخرى على مجال المغناطيسية ، حيـث تعـاونت مـع مجموعـة مـن البـاحثين بمعمل أرجون القومى * فى دراسة ظاهرة الرفع المغناطيسى فى الـــهواء باستخدام المـواد فائقـة الموصليـة . وقد كنـا نتطلـع إلى الاستفادة من نتائج بحوثنا هذه فى تطبيقين مستقلين للرفع المغناطيسـى : مركبات الرفع المغناطيسى عاليـة السـرعة وحدافـات

* Argonne National Laboratory .

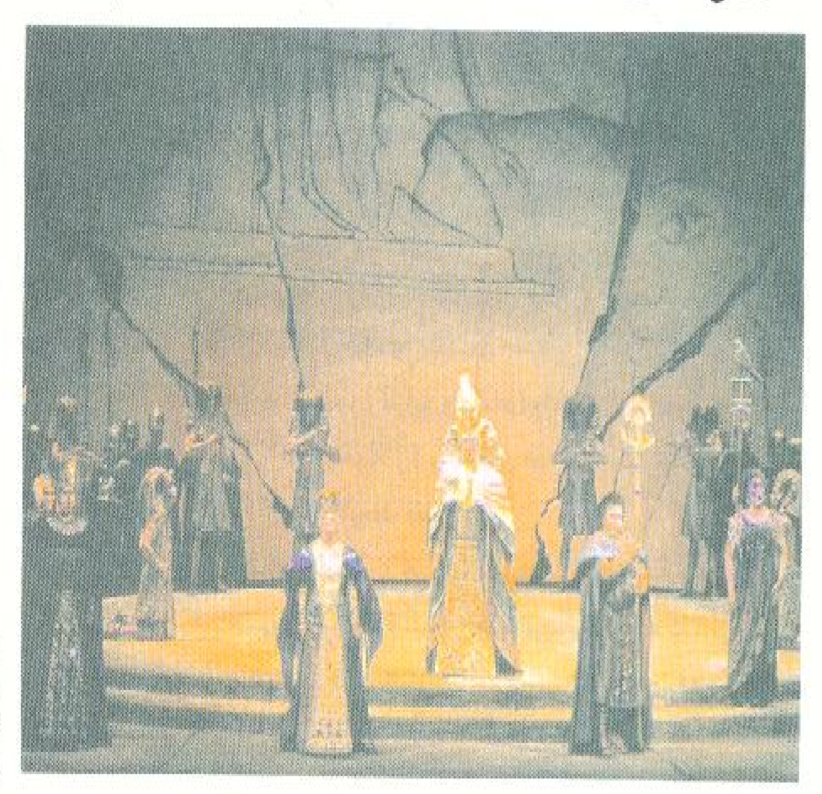
الرفع المغناطيسى لخزن الطاقة . وبالإضافة إلى الإثارة والمتعة التى نجدها فى فيزياء هذا الموضوع ، فإن هذين التطبيقين يمثلان إمكانية هائلة لتحسين بيئتنا ، وهو اهتمامى الأساسى الذى لا يتغير .

يصعب فى أغلب الأحيان التفرقة بين الفيزياء الأساسية والفيزياء التطبيقية . فما يبدأ كبحث لحل مشكلة علمية قد يؤدى أحيانًا إلى اكتشافات جديدة ، بل قد يؤدى إلى نيل جائزة نوبل الرفيعة (مثل الموصلية الفائقة عند درجات الحرارة العالية والليزر والترانزستور والثنائى النفقى . . إلخ) . وكذلك قد يؤدى بحث فيزيائى أساسى إلى تطبيقات عملية لم تكن متوقعة على الإطلاق .

وسواء قادتك اهتماماتك وميولك ، بالإضافة إلى فرص العمل المستقبلية (مع ملاحظ أن العمل فى مجال الفيزياء التطبيقية أكثر عطاء من الناحية المادية عمومًا) ، إلى البحث الأساسى أو البحث التطبيقى لحل المشاكل العملية ، فإن من المؤكد أنه لا يخلو من التحدى والمتعة فى نفس الوقت .

وتصل حساسية الأذن إلى أقصى قيمة لها بالقرب من 3000 Hz ، أما عند الترددات التى تختلف عن هذه القيمة فيكون من الضرورى زيادة شدة الصوت حتى تتمكن الأذن سماعه . وهذا التغير فى حساسية الأذن مع التردد موضح بالشكل 15-6 . ويمثل المنحنى السفلى فى هذا الشكل أقل مستوى شدة مسموع كدالة فى التردد . فمثلاً ، تستطيع الأذن العادية سماع صوت تردده 1000 Hz عندما يكون مستوى شدته حوالى 5 dB على الأقل ، بينما لا تستطيع هذه الأذن سماع صوت تردده 100 Hz إلا إذا كان مستوى شدته حوالى 30 dB على الأقل . وبالطبع فإن سماع الأصوات التى تقع تردداتها بالقرب من حدى الصوت المسموع (20 Hz و 20,000 Hz) يتطلب أن تكون شدتها كبيرة جدًا .

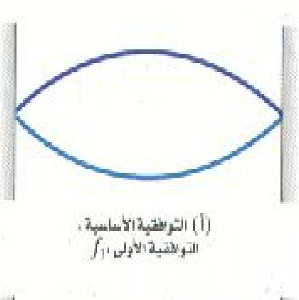
ويوضح المنحنى العلوى بالشكل 15-6 مستوى شدة الصوت المسبب للألم كدالة فى

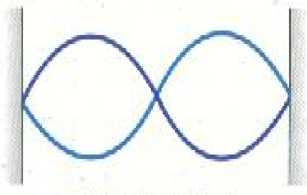


الرباعى الصوتى مثال لأربعة أصوات مختلفة فى التردد والنوعية . ويؤدى امتزاج هذه الأصوات مع بعضها البعض إلى تكوين موسيقى ممتع .

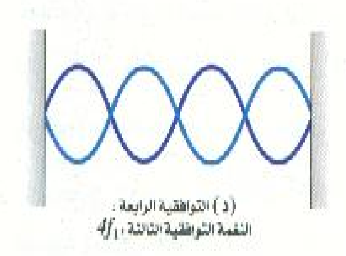
التردد . لاحظ أن مستوى الشدة المسبب للألم لا يتغير كثيرًا مع التردد ، وأن مستوى شدة قدره 120 dB يعتبر مستوى مؤلمًا ؛ وقد وجد أن مثل هذه المستويات الصوتية العالية يمكن أن تسبب تلفًا دائمًا بالأذن . والحقيقة أن التعرض لأصوات مستوى شدتها حوالي 90 dB فقط لفترات طويلة يمكن أن يسبب فقدانًا تامًا للسمع ، هذا بالطبع بالإضافة إلى عوامل أخرى يمكنها أن تؤدى إلى نفس النتيجة .

15-7 درجة الصوت ونوعية الصوت


(أ) التوافقية الأساسية ، التوافقية الأولى ؛ f_1


(ب) التوافقية الثانية ، النغمة التوافقية الأولى ؛ $2f_1$


(جـ) التوافقية الثالثة ، النغمة التوافقية الثانية ؛ $3f_1$


(د) التوافقية الرابعة ، النغمة التوافقية الثالثة ؛ $4f_1$

شكل 7-15:
أبسط أربعة أنماط اهتزازية للموجات المستقرة على وتر .

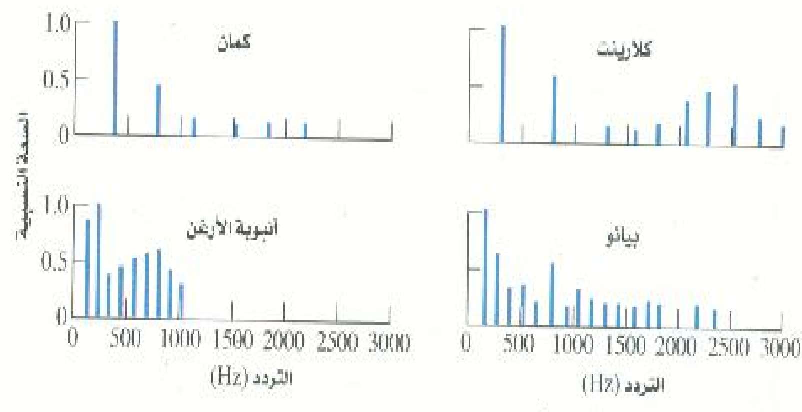
درجة الصوت هى إدراكنا الكيفى لما إذا كان صوت موسيقى معين (أى نغمة موسيقية) عاليًا (حادًا) كصوت مغنى الأوبرا السوبرانو ، أو منخفضًا (غليظًا) كصوت مغنى الأوبرا الباس . ولدراسة درجة الصوت وعلاقتها بخواص الصوت الأخرى ، يمكننا الاستعانة بالتجربة البسيطة الآتية . عندما يعمل مجهار عالى الجودة مستمدا طاقته من نظام كهربائى يولد قوة جيبية سيكون الصوت المنبعث من المجهار على شكل موجة جيبية نقية تقريبًا ، ويكون ترددها مساويًا لتردد النظام الكهربائى . وتعتبر إشارة الاختبار التى تذيعها محطات الإرسال الإذاعى أحد أشهر الأمثلة للصوت ذى التردد الواحد ، ويستطيع أى شخص غير أصم للطبقات الصوتية أن يقارن درجة هذا الصوت بدرجة أى صوت آخر . وإذا رفعنا تردد القوة الحافزة سوف يزداد بالتالى تردد الصوت المنبعث من الجهاز ، وعندئذ سوف يلاحظ السامع أن درجة الصوت الجديد أعلى من درجة الصوت الأول . وفى هاتين الحالتين تعتبر درجة الصوت مرادفًا لتردد الصوت تقريبًا . والعكس صحيح كذلك ، فإذا انخفض التردد تنخفض درجة الصوت بالتبعية .

ومع ذلك فإن الموجات الصوتية وحيدة التردد ليست شائعة بين الأصوات التى نسمعها عادة . فإذا نقر أحد أوتار الكمان مثلاً باليد أو بالقوس فلن تكون الموجة الصوتية الصادرة منه موجة جيبية نقية . ويستطيع أى شخص أن يتحقق من ذلك بسهولة عندما يقارن النغمة التى يحصل عليها عازف كمان ماهر بالنغمة التى يحصل عليها عازف مبتدئ . ففى الحالة الأولى تكون النغمة تامة وشجية ، بينما قد يحصل العازف المبتدئ على أصوات خشنة ذات صريف ومثيرة للأعصاب من نفس الوتر . ويقال عندئذ أن **نوعية النغمة** مختلفة فى الحالتين .

وكما رأينا فى القسم 10-14 ، يمكن أن يهتز الوتر اهتزازًا رنينيًا بأكثر من طريقة واحدة ، ويوضح الشكل 7-15 بعض الأنماط الاهتزازية البسيطة للوتر وأسماء هذه الأنماط . ونظرًا لأن النسبة بين الأطوال الموجية فى الحالات المبينة هى $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{3}:\frac{1}{4}$ ، وحيث أن $f = v/\lambda$ ، فإن النسبة بين ترددات الاهتزاز لهذه الأنماط تكون 4 : 3 : 2 : 1 .

ومع ذلك فإن من الصعوبة بمكان أن نسبب اهتزاز الوتر كما هو موضح فى كل من

الأنماط المبينة بالشكل 15-7 بالضبط . وبدلاً من ذلك ، إذا أمررنا القوس على الوتر بالقرب من إحدى نهايتيه ، كما يحدث دائمًا ، سوف يهتز الوتر بعدة طرق مختلفة معًا ، ويتسبب ذلك في ظهور عدة توافقيات في نفس الوقت . ولإيجاد الاهتزاز الناتج يصبح من الضرورى علينا جمع موجات مختلف التوافقيات المثارة . وحيث أن التوافقيات المثارة تختلف في السعة عن بعضها البعض ، يجب علينا بالطبع استخدام السعة الصحيحة المناسبة لكل توافقية على حدة في عملية الجمع .



شكل 15-8:
لكل آلة موسيقية صوتها المميز . وتعتمد نوعية الصوت على التوافقيات المكونة له والسعة النسبية لكل توافقية . تمثل القضبان الرأسية الشدة (السعة) النسبية لكل موجة توافقية .

ويوضح الشكل 15-8 مثالاً نموذجيًا لاهتزاز وتر من أوتار الكمان ، حيث تمثل سعة الاهتزاز لمختلف التوافقيات في الشكل بأطوال الأعمدة الرأسية . ويلاحظ في هذه الحالة أن جميع التوافقيات ضعيفة نسبيًا باستثناء التوافقيتين الأولى والثانية . وبالرغم من ذلك فإن النغمة التي تسمعها الأذن سوف تختلف بالضرورة عن النغمة التي تسمعها عند وجود التوافقية الأولى أو الثانية وحدها .

ويوضح الشكل 15-8 أيضًا الأشكال البيانية المماثلة في حالة أصوات بعض الآلات الموسيقية الأخرى . ويمكننا أن نرى من هذا الشكل أن وتر البيانو يعطى عددًا أكبر من التوافقيات بالمقارنة بوتر الكمان . وربما يكون ذلك راجعًا إلى الطريقة المستخدمة في هز الوتر . ففي حالة الكمان يمرر العازف القوس على الوتر ببطء ونعومة ، بينما يثار اهتزاز وتر البيانو بواسطة ضربة من المطرقة .

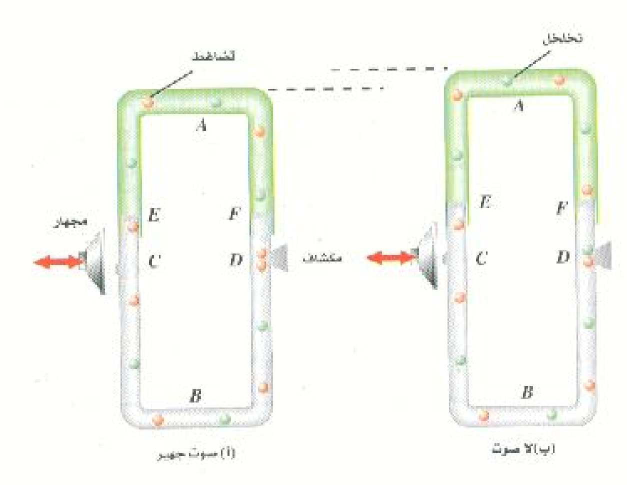
يستنتج مما سبق أن **نوعية الصوت تعتمد على عدد التوافقيات المكونة له والسعة النسبية لمختلف هذه التوافقيات** . وإذا كانت جميع الأصوات موجات جيبية نقية فإن هذا سوف يفقد الأصوات قدرًا كبيرًا من تنوعها . وعندئذ ستكون نغمة جميع الأصوات البشرية واحدة ، وعندئذ سوف يمكن تمييز صوت الشخص بالتردد المميز في مقام الصوت أو ارتفاعه فقط . كذلك فإن الموسيقى سوف تفقد قدرًا كبيرًا من جمالها لو كانت نوعية جميع الأصوات واحدة .

ليس من السهل دائمًا تحديد درجة الصوت ، وخاصة إذا كان الصوت معقدًا كصوت البيانو أو الكلارينت . ذلك أن درجة الصوت في مثل هذه الحالات ليست مرادفًا للتردد ، لأن الصوت يحتوى على عدة موجات مختلفة في التردد ومتساوية

تقريبًا فى السعة . ويوجد بين الناس من يعانون ضعفًا غير عادى فى السمع وقد لا يعلمون هم أنفسهم بذلك ـ إذ لا يستطيع هؤلاء سماع أى صوت يزيد تردده عن حوالى 6000 Hz . وحيث أن معظم الأصوات التى نسمعها تتكون ، جزئيًا على الأقل ، من ترددات أقل من هذه القيمة فإن هؤلاء يمكنهم سماع الأصوات المسموعة لغيرهم . مع ذلك فإن **نوعية** الأصوات التى يسمعونها تختلف تمامًا عن نوعية الأصوات التى يسمعها شخص ذو سمع عادى . ويتضح لنا من ذلك إذن أن نوعية الصوت ودرجة الصوت خاصيتان معقدتان وغير موضوعيتان إلى حد كبير .

15-8 تداخل الموجات الصوتية

لنفرض أن لدينا نظامًا أنبوبيًا كالمبين بالشكل 9-15 ، وأن موجة جيبية وحيدة التردد قد أرسلت داخل الأنبوبة من الجانب الأيسر باستخدام مجهار عالى الجودة . عندئذ سينقسم الصوت إلى جزئين بحيث تمر نصف الشدة خلال الجزء العلوى ويمر النصف المتبقى خلال الأنبوبة السفلية ، ومعنى ذلك أن كل أنبوبة تحمل نصف كمية الصوت ؛ وهذا الصوت عبارة عن حركة موجية فى الهواء تتكون من سلسلة من التضاغطات والتخلخلات .



شكل 9-15:
تنقسم الموجة الصادرة من المجهار إلى نصفين . وتمثل التضاغطات فى الموجة الصوتية بالنقط الحمراء ، بينما تمثل التخلخلات بالنقط الخضراء . وعندما يتحد جزئى الموجة مرة أخرى عند المكشاف D قد ينتج صوت جهير أو ضعيف ، ويتوقف ذلك على طول مسار كل من نصفى الموجة الأصلية . فى الجزء (أ) تقوى التضاغطات الموجية بعضها البعض فيكون الصوت الناتج جهيرًا . وفى (ب) أصبح طول المسار العلوى أطول بمقدار $\lambda/2$ من المسار السفلى . ونتيجة لذلك تلتقى القمة الموجية دائمًا مع قاع موجى عند اتحاد الموجتين ، مما يؤدى إلى تلاشى الموجة المحصلة ، وبذلك يكون مستوى الصوت ضعيفًا أو صفرًا .

وفى نهاية الأمر تتحد الموجتان الصوتيان عند المخرج بالجانب الأيمن D حيث يوضع مكشاف صوتى كالأذن أو الميكروفون . ويمكن أن يكون الصوت المنبعث عند D جهيرًا أو ضعيفًا حسب موضع الأنبوبة العليا EAF . علاوة على ذلك ، إذا رفعت هذه الأنبوبة إلى أعلى ببطئ شديد سيلاحظ أن شدة الصوت عند D سوف تزداد ثم تقل بطريقة تبادلية . وسوف ندرس الآن أسباب هذه الظاهرة التى تعرف باسم **التداخل** .

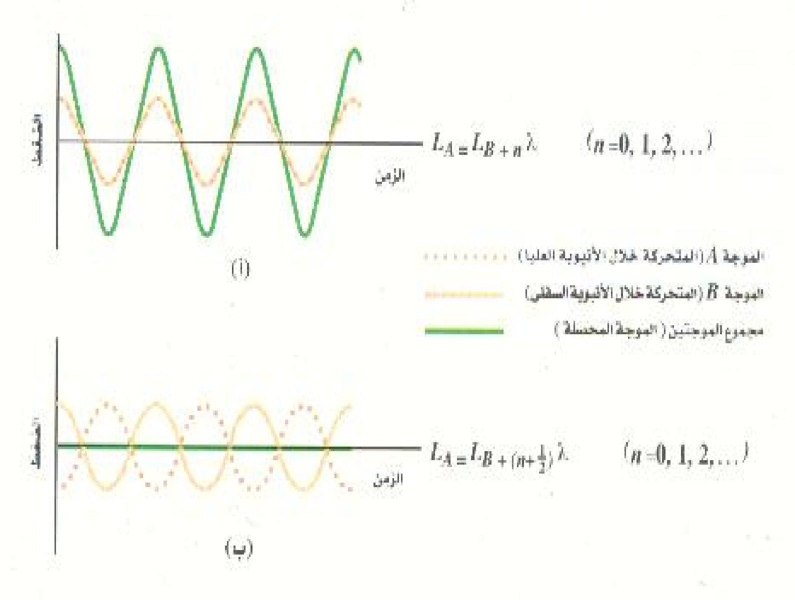
عندما ينضغط الهواء نتيجة لحركة رق المجهار إلى اليمين تتكون منطقة ذات

ضغط مرتفع (تضاغط) فى الأنبوبة عند C ، وهذا التضاغط يؤدى إلى تحرك تضاغطين في كلا الأنبوبتين ، واحد تجاه A والآخر تجاه B . معنى ذلك بأسلوب آخر أن التضاغط الأصلى عند C ينقسم إلى جزئين متساويين ، وأن أحدهما يتحرك إلى أعلى تجاه A بينما يتحرك الآخر إلى أسفل تجاه B . وحيث أن التضاغطات ، الممثلة فى الشكل بالنقط الحمراء ، تتحرك فى الأنبوبتين بسرعة الصوت ، فإن هذين التضاغطين سوف يصلان إلى النقطة D فى نفس اللحظة ، بشرط أن يكون طول الأنبوبة L_A من C إلى D مرورًا بالنقطة A مساويًا لطول الأنبوبة L_B من C إلى D مرورًا بالنقطة B . وعند النقطة D يتحد التضاغطان مرة أخرى ليتكون بذلك التضاغط الأصلى الذى يخرج من الأنبوبة عند D ، وهذا الموقف موضح بالشكل 15-9 أ . لاحظ أن النقط الخضراء تمثل التخلخلات .

ويمكن تمثيل الموقف الموضح بالشكل 15-9 أ بالمنحنى البيانى الموضح بالشكل 15-10 أ ، حيث رسمت موجات كل من نصفى الأنبوبة على حدة . فى لحظة الانقسام عند C كانت هذه الموجات **متطاورة** مع بعضها البعض ؛ وعند اتحادهما مرة أخرى عند D بعد أن قطعت كل منهما نفس المسافة تمامًا تظل الموجات متطاورة أيضًا مع بعضها البعض . وهذا يعنى أن القمم تتقابل مع بعضها وأن القيعان تتقابل مع بعضها دائمًا عند النقطة D . وطبقًا لمبدأ التراكب المذكور بالفصل الرابع عشر فإن سعة الموجة المحصلة تساوى المجموع الجبرى لسعتى هاتين الموجتين ؛ ويوضح الشكل 15-10 أ هذه السعة الكبيرة للموجة المحصلة .

هذا الموقف السابق وصفه عاليًا مثال **للتداخل البنائي** الذى تقوى فيه سعتا الموجتين أحداهما الأخرى ، وينتج عن ذلك أن شدة الصوت عند D تكون كبيرة نسبيًا .

لننظر الآن إلى الشكل 15-9 ب ، حيث زيد طول المسار CAD بتحريك الجزء العلوى من الأنبوبة إلى أعلى مبتعدًا عن المصدر والكشاف . لنفرض الآن أن المسار العلوى أطول من السفلى بمقدار نصف الطول الموجى . فى هذه الحالة سوف يتبقى على



شكل 15-10:
الموجتان A و B قد تقوى أو تلاشى أحداهما الأخرى ، ويعتمد ذلك على موضعيهما بالنسبة لبعضهما البعض . الموجتان فى (أ) متطاورتان ، ولكنهما متفاوتتى الطور بمقدار 180° (أو نصف الطول الموجى) فى (ب) .

نصف القمة المتحرك من C إلى D عن طريق المسار العلوى أن يقطع مسافة قدرها نصف الطول الموجى كى يصل إلى D بعد أن يكون توأمه قد وصل بالفعل إلى D عن طريق المسار السفلى ، وهذا يعنى أن الموجة المتحركة فى المسار العلوى تصل إلى D **متفاوتة فى الطور** بمقدار نصف دورة مع الموجة المتحركة فى المسار السفلى ، أى أن قمم إحدى الموجات تلتقى دائمًا مع قيعان الأخرى عند هذه النقطة . والنتيجة الحتمية لذلك طبقًا لمبدأ التراكب أن **تتلاشى** السعتان إحداهما مع الأخرى ، ولن يكشف أى صوت عند D . هذا الموقف مثال **للتداخل الهدمى** ، وهو موضح بيانيًا بالشكل 10-15 ب .

ويمكن تعميم هذه النتائج بملاحظة أن التداخل البنائى يحدث مرة أخرى عندما يزيد طول الأنبوبة العلوية عن السفلية بمقدار طول موجى كامل . ولكن يجب ملاحظة أن نصفى القمة المتكونان نتيجة لانقسام قمة معينة عند C لن يلتقيا سويًا عند D . ولكن ما يحدث فى الواقع هو أن أى قمة تصل إلى D عن طريق المسار السفلى سوف تلتقى مع قمة أخرى قد سبق انبعاثها عند C بمقدار دورة واحدة كاملة . وبالرغم من أن هاتين القمتين الملتقتين عند D لم تبدءا سويًا عند النقطة C ، فإن هذا ليس هامًا من وجهة نظر التداخل . أى أن نتائج تداخل أى موجتين تكون واحدة بصرف النظر عن **أى** القمم أو القيعان تلتقى عند نقطة التداخل . وهكذا فإن التداخل البنائى يحدث دائمًا عندما يكون المسار L_A أطول أو أقصر من المسار L_B بمقدار عدد صحيح من الأطوال الموجية . إذن :

$$L_A = L_B \pm n\lambda \qquad \text{حيث} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$$

للتداخل البنائى (للصوت الجهير) .

وبنفس الأسلوب يمكننا استنتاج الشرط العام للتداخل الهدمى ، إذ يحدث التداخل الهدمى دائمًا طالما كان الفرق بين مسارى الموجتين المتداخلتين عند موضع التداخل عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجى ، إذن :

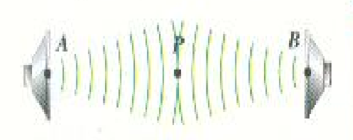
$$L_A = L_B \pm n\lambda/2 \qquad \text{حيث} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$$

للتداخل الهدمى (لا صوت) .

وليس من الضرورى أن يكون لدينا نظامًا أنبوبيًا لكى يحدث التداخل ، إذ أن كل ما نحتاجه هو الحصول على موجتين متماثلتين تمامًا فى التردد والشكل . فإذا اتحدت هاتان الموجتان بعد قطعهما مسافتين مختلفتين فإنهما سوف تتداخلان أحداهما مع الأخرى ، ويوضح المثال التالى موقفًا آخر يتعلق بالتداخل .

مثال 3-15 :

المصدران الصوتيان المتماثلان فى الشكل 11-15 يهتزان اهتزازًا متطاورًا ويرسلان موجتين متماثلتين ($\lambda = 70$ cm) تجاه أحدهما الآخر . وقف مشاهد فى نقطة المنتصف P بين المصدرين فسمع صوتًا جهيرًا ، ثم بدأ فى الحركة ببطء تجاه المصدر B . ما هى المسافة التى يجب أن يتحركها المشاهد حتى يصبح الصوت المسموع ضعيفًا ؟



شكل 11-15:
تقوى الموجتان إحداهما الأخرى عند P إذا كان $\overline{AP} = \overline{PB}$.

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الشرط اللازم تحققه ليكون الصوت ضعيفًا جدًا ؟

الإجابة : عندما تصل الموجتان من المصدر إلى المشاهد متفاوتتى الطور بمقدار نصف دورة يحدث بينهما تداخل هدمى .

سؤال : لماذا لا يجب أن تصبح شدة الصوت صفرًا إذا كان هذا تداخلاً هدميًا ؟

الإجابة : تذكر أن شدة الموجات ثلاثية الأبعاد تقل مع البعد عن المصدر . وحيث أن P تقع فى منتصف المسافة بين المصدرين فإن شدتى الموجتين عند هذه النقطة تكون صفرًا . وحيث أن المشاهد يتحرك تجاه B ستكون شدة الموجات الواصلة إليه من B أكبر قليلاً من الموجات الواصلة إليه من A عند نقطة التداخل .

سؤال : فى أى موضع سوف يحدث ذلك ؟

الإجابة : عندما يكون بعد A عن المشاهد أكبر بمقدار $\lambda/2$ من بعد B عنه .

سؤال : ما هو الفرق بين هاتين المسافتين نتيجة لحركة المشاهد مسافة x تجاه B ؟

الإجابة : تزيد المسافة AP بمقدار x وتقل PB بمقدار x . إذن ، الفرق $AP - PB$ يساوى $2x$.

الحل والمناقشة : نصف الطول الموجى يساوى 35 cm . إذن :

$$AP - PB = 2x = 35 \text{ cm}$$

أى أن المشاهد يجب أن يتحرك مسافة قدرها $35 \text{ cm}/2 = 17.5 \text{ cm}$ تجاه B .

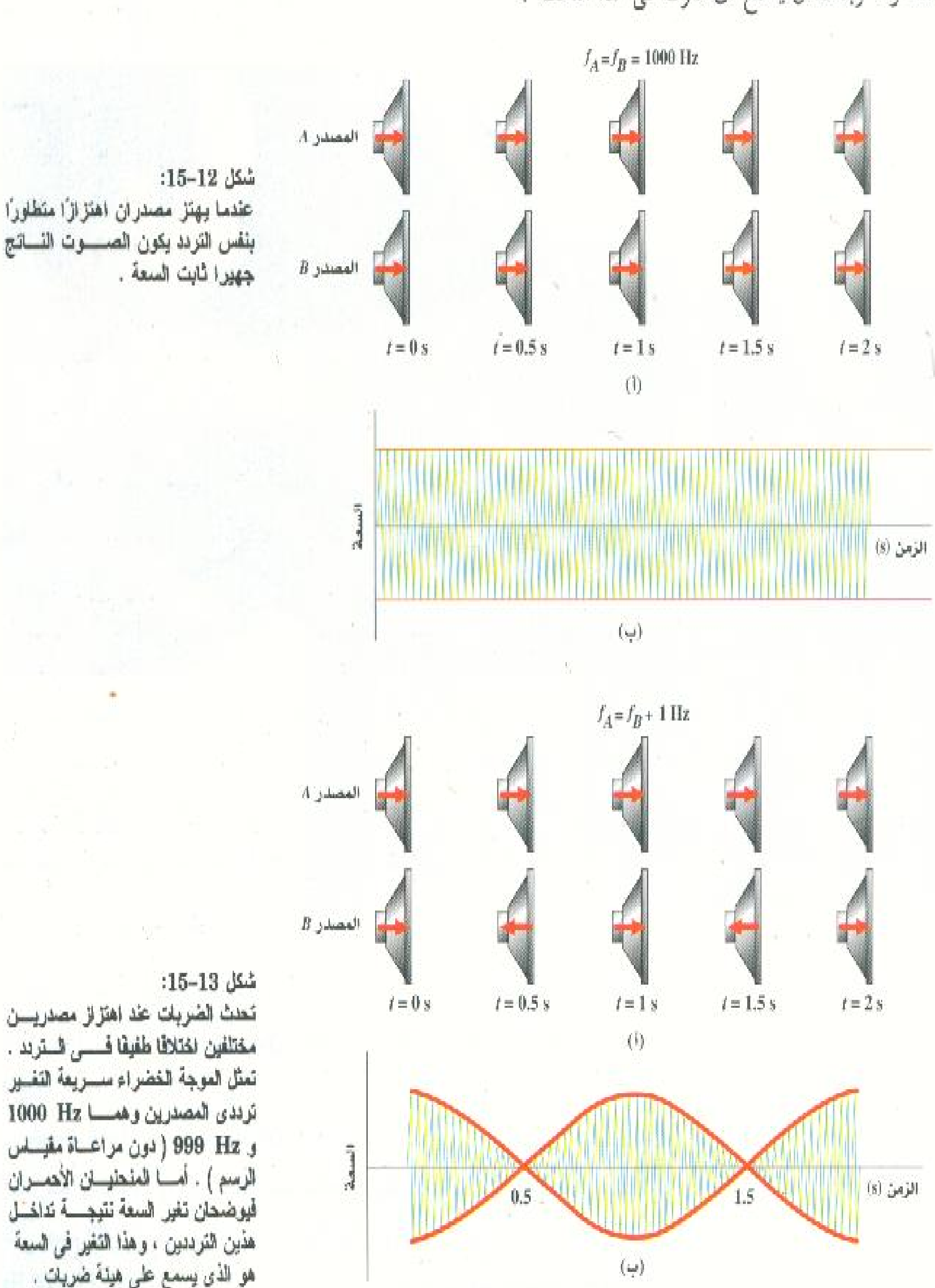
15-9 الضربات

تضبط أوتار البيانو بمقارنة نغماتها بنغمات شوكة رنانة قياسية معلومة التردد وعندما يقوم الموسيقيون بضبط أحد أوتار البيانو فإنهم لا ينصتون ببساطة إلى نغمة الوتر ليروا ما إذا كانت مماثلة لنغمة الشوكة الرنانة المستخدمة فى المقارنة ، بل يستخدموا طريقة أكثر دقة للحكم على مدى دقة ضبط الوتر ، وهى أن ينصتوا إلى **الضربات** بين صوتى الوتر والشوكة الرنانة . وهذه طريقة دقيقة جدًا لتعيين الترددات المتساوية ، وتستخدم على نطاق واسع لهذا الغرض .

لنبدأ أولاً بدراسة ما يحدث عندما يصدر مصدران مهتزان موجتين متساويتين تمامًا فى التردد ومتطاورتين (متزامنتين) إحداهما مع الأخرى . فإذا كان تردد كل من هذين المصدرين 1000 Hz مثلاً فإن محصلة تراكب الموجتين الصادرتين منهما ستكون موجة ثابتة السعة ترددها 1000 Hz أيضًا ، وهذا موضح بالشكل 12-15 . لنفرض الآن أن تردد المصدر B قد أصبح 999 Hz مع بقاء تردد المصدر A دون تغير كما هو موضح بالشكل 13-15 .

عند اللحظة $t = 0$ سيكون المجهاران متطاورين ، أى أنهما يبعثان تضاغطين فى هذه اللحظة ، كما هو مبين بالسهمين المشيرين إلى اليمين . فإذا كانت الأذن تقع على نفس البعد من كل من المجهارين سوف يصل التضاغطان إلى الأذن معًا ، وتكون النتيجة

تضاغطاً كبيراً ويكون الصوت المسموع جهيراً . وبمرور الزمن سوف يبدأ المجهار B ، المهتز بتردد أصغر قليلاً من A ، فى التخلف عن A . فبعد 0.5 s سيكون المجهار A قد اهتز 500.00 مرة كاملة وبذلك ينبعث منه تضاغط فى هذه اللحظة ، كما هو مبين بالشكل 13-15 عند $t = 0.5$ s . أما المجهار B فيكون قد اهتز 499.50 مرة فقط ، وبذلك يكون متاخراً عن A بمقدار نصف دورة بالضبط ، أى أنه سوف يبعث تخلخلاً (اتجاه السهم إلى اليسار) فى نفس هذه اللحظة . وعليه فإن التضاغط المنبعث من A سوف يصل إلى الأذن فى نفس اللحظة مع التخلخل المنبعث من B حيث يلاشى كل منهما الآخر ، وبذلك لن يسمع أى صوت فى هذه اللحظة .



شكل 12-15:
عندما يهتز مصدران اهتزازاً متطوراً بنفس التردد يكون الصوت الناتج جهيرا ثابت السعة .

شكل 13-15:
تحدث الضربات عند اهتزاز مصدرين مختلفين اختلافا طفيفا فى التردد . تمثل الموجة الخضراء سريعة التغير ترددى المصدرين وهما 1000 Hz و 999 Hz (دون مراعاة مقياس الرسم) . أما المنحنيان الأحمران فيوضحان تغير السعة نتيجة تداخل هذين الترددين ، وهذا التغير فى السعة هو الذى يسمع على هيئة ضربات .

وباستمرار الزمن فى المرور يستمر تأخر المجهار B عن A . وبعد 1 s سيكون B قد اهتز 999 مرة كاملة بينما تكون A قد اهتز 1000 مرة كاملة ومعنى ذلك أن المصدر B سيكون متأخرًا بمقدار دورة واحدة كاملة عن A . ومن ثم سوف يبعث المصدران تضاغطين متزامنين ، ولذلك يسمع الصوت الجهير مرة ثانية .

وتتكرر هذه العملية بمرور الزمن مرات ومرات ، وهذا مبين فى الأجزاء التالية للشكل 13-15 أ . ففى اللحظات s . . . . ,3 ,2 ,1 ,0 يكون المصدران متطاورين ويكون الصوت المسموع جهيرًا . أما فى اللحظات s . . . . ,2.5 ,1.5 ,0.5 فلن يسمع أى صوت لأن المصدرين متفاوتي الطور بمقدار $180°$.



يقوم الموسيقى بضبط الشد فى وتر البيانو لتغيير تردده . وتعتمد إحدى التقنيات المستخدمة لهذا الغرض على الإنصات إلى الضربات بين تردد الوتر وتردد مصدر صوتى قياسى .

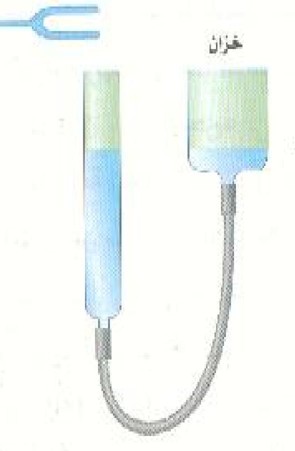
يوضح الشكل 13-15 ب الموجة الصوتية المحصلة كدالة فى الزمن . لاحظ أن سعة الموجة المحصلة تتغير مع الزمن ، وأن السعة تنتقل من قيمة عظمى إلى التالية خلال 1 s . وتسمع الأذن هذه النبضات فى السعة بتردد قدره 1/s ، وتعرف هذه النبضات باسم الضربات . وبناء على هذا التحليل يمكننا استنتاج ما يلى :

عدد الضربات فى الثانية (تردد الضربات) يساوى الفرق بين ترددى المصدرين .

فمثلاً ، عندما يكون ترددا المصدرين الصوتين 100 Hz و 97 Hz ، يكون تردد الضربات 3/s . وبالمثل ، يولد مصدران صوتيان ترددهما 5000 Hz و 5010 Hz عشر ضربات فى الثانية .

وتمنحنا ظاهرة الضربات وسيلة فائقة الحساسية لضبط الآلات الموسيقية . ولضبط أوتار البيانو مثلاً يستخدم الموسيقى مصدرًا يبعث الصوت بالتردد المطلوب ثم يقوم بتعديل شد الوتر حتى يصبح الفارق الزمنى بين الضربات كبيرًا جدًا . وبهذه الطريقة يمكن ضبط وتر تردده 5000 Hz لأقرب 1 Hz بنفس السهولة التى يمكن أن يضبط بها وتر تردده 50 Hz .

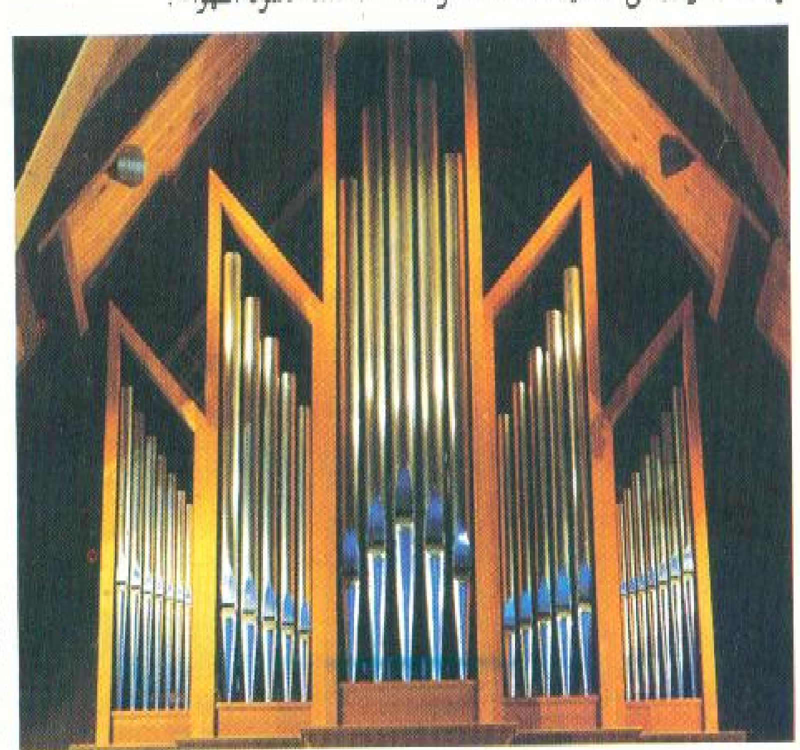
ويحدث فى بعض الأحيان أن يؤدى تردد الضربات بين موجتين إلى سماع صوت ثالث متميز . فإذا فرضنا مثلاً أن تردد الصوتين 1000 Hz و 1200 Hz فإن تردد الضربات سيكون 200 Hz . وحيث أن هذا التردد يقع فى مدى الترددات المسموعة فإن الأذن سوف تسمع هذا التردد بالإضافة إلى الترددين الأصليين .



شكل 14-15:
يحدث الرنين عندما يكون مستوى الماء بالأنبوبة فى الموضع الصحيح بالضبط .

15-10 الرنين فى الأعمدة الهوائية

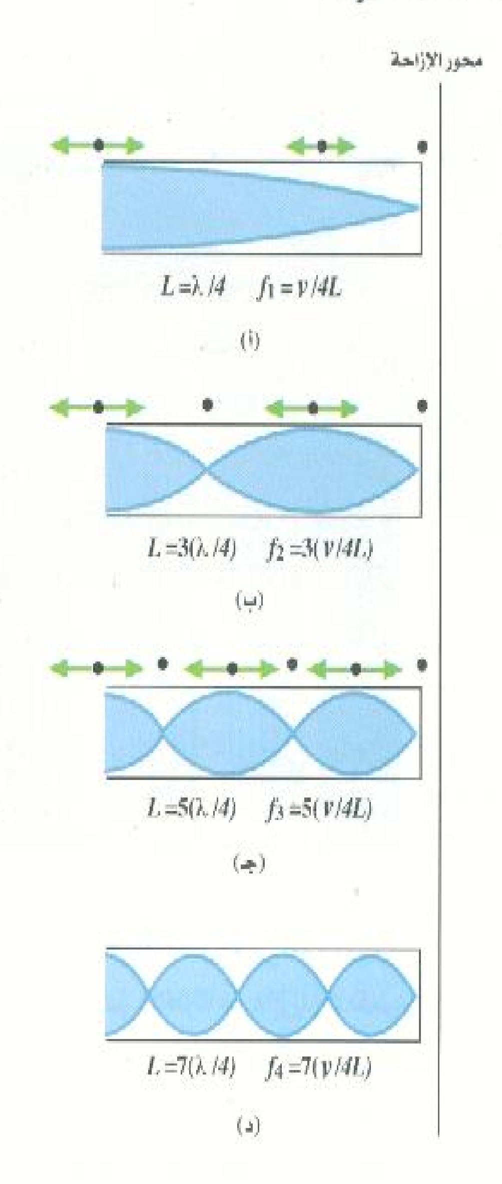
إذا وضعت شوكة رنانة مهتزة بالقرب من الطرف المفتوح لأنبوبة زجاجية مملوءة جزئيًا بالماء فإن صوت الشوكة يمكن أن يكبر بدرجة كبيرة تحت شروط معينة . ولتفسير هذه الظاهرة ، انظر التجربة الموضحة بالشكل 14-15 . توضع الشوكة الرنانة المهتزة بالقرب من فوهة الأنبوبة كما بالشكل ثم يخفض خزان الماء إلى أسفل بحيث ينخفض مستوى الماء فى الأنبوبة . وعندما يصل مستوى الماء إلى ارتفاع معين سوف يهتز عمود الماء الموجود فى الأنبوبة اهتزازًا رنينيًا قويًا استجابة للصوت الصادر من الشوكة الرنانة . ويحدث الرنين فى الحقيقة عادة عند ارتفاعات مختلفة لعمود الهواء .



ترن أنابيب الأرغن مختلفة الطول عند ترددات مختلفة . هل يمكنك أن تذكر العوامل الفيزيائية الأخرى التى يعتمد عليها التردد الرنينى ؟

هذا الموقف يشبه إلى حد كبير حالة الموجات المستقرة على وتر مهتز . فبدلاً من الوتر المثار بواسطة مهتز عند أحد طرفيه لدينا هنا عمود هوائى ومصدر صوتى عند نهايته المفتوحة . وكما أن المهتز يرسل الموجة على الوتر المشدود كى تتحرك عليه إلى أن تنعكس عند الطرف الآخر ، فإن المصدر الصوتى هنا يرسل الموجة الصوتية فى العمود الهوائى ، وهذه تنعكس خلفًا عند وصولها إلى سطح الماء . وقد رأينا فى الفصل الرابع عشر أن الوتر يرن فقط عندما يستطيع الطول الموجى للموجة تكوين نمط موجى مستقر بطول الوتر . ويتحقق ذلك على وجه التحديد عندما تتكون عقدتان عند طرفى الوتر ، ومن ثم فإن الوتر يرن فقط إذا كان طوله $n\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$ ، حيث n عدد صحيح و $\frac{1}{2}\lambda$ المسافة بين عقدتين .

ولكن هناك فرقًا جوهريًا بين رنين العمود الهوائي الموضح بالشكل 14-15 ورنين الوتر . فالعمود الهوائي في الأنبوبة مفتوح عند طرفه العلوي ومغلق بسطح الماء عند الطرف السفلي . فإذا نظرنا إلى الطرف السفلي للعمود الهوائي سنجد أن سطح الماء سوف يمنع الحركة الطولية للهواء عند هذا الطرف ، ومن ثم يجب أن تتكون عقدة لنمط الاهتزاز الرنيني في هذا الموضع . أما عند الطرف العلوي المفتوح للعمود فإن الهواء يمكنه أن يتحرك بحرية في المنطقة الواقعة فوق العمود الهوائي بالأنبوبة ؛ وبذلك تصل سعة الاهتزاز الطولي إلى أقصى قيمة عند هذه النقطة ، أي أن هذه النقطة تمثل موضع بطن موجي* . وبناء على ذلك فإن العمود الهوائي الموضح بالشكل 14-15 سوف يهتز اهتزازًا رنينيًا فقط عندما تتكون عقدة عند طرفه المغلق وبطن عند طرفه المفتوح ، وهذا لا يتحقق إلا عند أطوال موجية معينة . ويمثل الشكل 15-15 بعض أنماط الاهتزاز الرنيني لمثل هذه الأعمدة الهوائية .



شكل 15-15:
بعض الأنماط الاهتزازية الرنينية لأنبوبة مفتوحة الطرفين . هذه المنحنيات تمثل الإزاحة الطولية مقابل الموضع بطول الأنبوبة . الإزاحات النسبية موضحة فوق الأشكال (أ) و (ب) و (جـ) .

* البطن لا يوجد عند طرف الأنبوبة تمامًا . ومع ذلك فإن هذا التعقيد يمكن إهماله عادة إذا كان نصف قطر الأنبوبة أصغر كثيرًا من λ .

لاحظ أن المنحنيات الموضحة بالشكل 15-15 ليست صورة للشكل الموجي كما كانت فى حالة الوتر ، ولكنها **تمثل سعة إزاحة جزيئات الـهواء على استقامة طول الأنبوبة** . كذلك فإن الإزاحة الطولية تكون صفرًا عند العقد ، وتصل إلى قيمتها العظمى عند البطون . وحيث أن المسافة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتاليين تساوى $\lambda/2$ فإن المسافة بين العقدة والبطن المجاور تساوى $\lambda/4$. وإذا رمزنا لطول العمود الـهوائى بالرمز L فإن هذا الطول فى الشكل 15-15 أ سيكون هو المسافة بين عقدة وبطن مجاور ، أى أن $L = \lambda/4$. أما فى الشكل 15-15 ب فإن طول العمود الـهوائى يساوى ثلاثة أمثال المسافة بين العقدة والبطن المجاور ؛ أى أن $L = 3(\lambda/4)$ ، وهكذا .

يمكن إيجاد الترددات الرنينية (التوافقية) الموضحة بالشكل 15-15 من العلاقة $f = v/\lambda$. وهذه الترددات يمكن حسابها بسهولة باستخدام قيم الأطوال الموجية اللازمة لتكون الأنماط الموجية المستقرة بدلالة طول الأنبوبة كما سبق ذكره . لاحظ أن التردد الرنينى الأول فوق التردد الأساسى f_1 يساوى $3f_1$ ، وهذا التردد يسمى عادة **النغمة التوافقية الأولى** . وبالمثل فإن النغمة التوافقية الثانية تساوى $5f_1$ ، والثالثة تساوى $7f_1$ ، وهكذا . وبناء على ذلك يستنتج أن الأنبوبة المغلقة عند أحد طرفيها تهتز اهتزازًا رنينيًا **عند النغمات التوافقية الفردية فقط** .

وليس من الضرورة لحدوث الرنين أن تكون الأنبوبة مغلقة عند أحد الطرفين . فمثلاً ، يمكنك استخدام أنبوبة زجاجية صغير كصفارة بالنفخ فى أحد طرفيها ، ويمثل الشكل 15-16 عددًا من أبسط الأنماط الرنينية الممكنة لأنبوبة مفتوحة الطرفين . ويلاحظ فى كل حالة أن طرفى الأنبوبة يمثلان موضعى بطنين ، لأن الـهواء يمكن أن يتحرك بحرية عند طرفى الأنبوبة . وهنا أيضًا يمكن حساب الترددات الرنينية باستخدام حقيقة أن $f = v/\lambda$ ، حيث λ معرف بالشكل فى حالة . لاحظ أن شروط الرنين للأنبوبة مفتوحة الطرفين هى نفس شروطه فى حالة الوتر المثبت من طرفيه . وحيث أن تردد الشوكة الرنانة أو أى مصدر آخر للاهتزاز يكون عادة معلومًا ، من الممكن استخدام ظاهرة الرنين فى أنبوبة كالمبينة بالشكل 15-14 لقياس سرعة الصوت .

تلخيصًا لكل ما سبق يمكننا كتابة الأطوال الموجية والترددات الرنينية لأعمدة الـهوائية كما يأتى :

بالنسبة للأنبوبة المفتوحة عند أحد الطرفين والمغلقة عن الطرف الآخر :

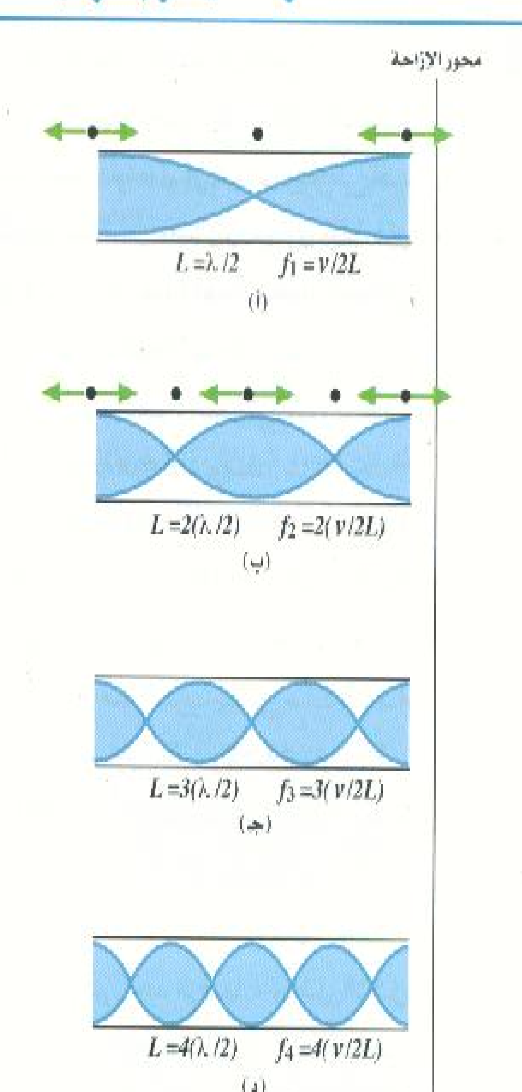
$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{nv}{4L}$$

(حيث n عدد صحيح فردى موجب) .

بالنسبة للأنبوبة مفتوحة الطرفين :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{nv}{2L}$$

(حيث n عدد صحيح موجب ما عدا الصفر) .



شكل 16-15:
منحنيات الإزاحة فى أنماط الاهتزاز الرنينى البسيطة فى حالة أنبوبة رنين مفتوحة الطرفين .

عند النفخ فى طرف أنبوبة تؤدى هذه العملية المعقدة إلى إرسال عدد كبير من الترددات فى الأنبوبة ، ولكن الأنبوبة تهتز اهتزازًا رنينيًا استجابة لتردد واحد أو اثنين فقط من بين هذه المجموعة الكبيرة من الترددات . ولهذا السبب فإن أنبوبة الرنين تصدر صوتًا قويًا ذا تردد واحد . ومع ذلك ، إذا حاولت النفخ فى الأنبوبة بشدة كافية سوف يمكنك غالبًا أن تسبب رنينًا ذا ترددين مختلفين فى نفس الوقت ، وعندئذ سوف تصدر الأنبوبة نغمتين فى نفس الوقت .

وتستخدم فكرة الأعمدة الهوائية الرنانة فى كثير من الآلات الموسيقية . فالفلوت أو السرناى (الفلوت الصغير) يتكون أساسًا من أنبوبة يمكن تغيير طولها بواسطة فتحات فى جدار الأنبوبة . والكلارينت أيضا تشبه ذلك ؛ ولكن الصوت يتولد فيها باهتزاز ريشه الفوهة (فوهة الآلة وليس العازف) . فإذا انتقلنا إلى البوق والمترددة (الترومبون) والتوبا سنجد أنها أيضًا أنظمة رنينية أنبوبية ولكنها أكثر تعقيدًا . ففى هذه الآلات يستخرج العازف النغمات الرنينية المختلفة بتغيير طول الأنبوبة الرنينية . وبالإضافة إلى ذلك فإن الموجات الصوتية تتولد فى هذه الآلات بواسطة اهتزاز شفتى العازف فى فوهة الآلة .

مثال 4 - 15

أنبوبة أرغن مفتوحة الطرفين طولها 60.0 cm ودرجة حرارة الهواء فيها 20°C . (أ) أوجد تردد الرنين الأساسي وتردد النغمة التوافقية الأولى . (ب) كرر (أ) لنفس الأنبوبة عندما تكون مغلقة من أحد طرفيها . (جـ) إذا ملأت الأنبوبة الأصلية بغاز الأرجون عند درجة 20°C ، فما هو تردد الرنين الأساسي ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي العلاقة اللازم استخدامها لتعيين الطول الموجي ؟

الإجابة : في حالة الأنبوبة مفتوحة الطرفين ، $L = \lambda_1/2$. إذن :

$$\lambda_1 = 2L$$

سؤال : ما هي الكميات الأخرى اللازم معرفتها لكي يمكننا حساب f_1 ؟

الإجابة : حيث أن $f_1 = v/\lambda_1$ ، إذن يجب معرفة السرعة الموجية v أيضًا .

سؤال : على ماذا تعتمد السرعة الموجية ؟

الإجابة : تعتمد v على درجة الحرارة المطلقة والكتلة الجزيئية للغاز والنسبة بين الحرارتين النوعيتين للغاز γ .

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

سؤال : الهواء خليط من الغازات . كيف يمكن إيجاد كتلته الجزيئية ؟

الإجابة : الهواء يتكون أساسًا من النيتروجين N_2 ($M = 28$ kg/kmol) بنسبة قدرها 80% والأكسجين O_2 (32 kg/kmol) بنسبة قدرها 20% تقريبًا . إذن ، قيمة M للهواء هي :

$$M_{air} = (0.80)28 + (0.20)32 = 28.8 \text{ kg/kmol}$$

سؤال : النغمة التوافقية الأولى يقصد بها أي التوافقيات ؟

الإجابة : يحدث الرنين في الأنبوبة مفتوحة الطرفين عند جميع التوافقيات الفردية والزوجية . أي أن النغمة التوافقية الأولى هي f_2 .

سؤال : هل توجد أي طريقة بسيطة لإيجاد النغمة التوافقية الأولى إذا علمنا f_1 ؟

الإجابة : نعم . فحيث أن v و L ثابتان ؛ وحيث أن كل تردد رنيني f_n يتناسب مع n ، يمكننا استخدام النسب بسهولة . فإذا كان n و m يرمزان لتوافقتين مختلفتين ، فإن النسبة ببساطة تكون :

$$\frac{f_n}{f_m} = \frac{n}{m}$$

سؤال : ماذا يتغير إذا كانت الأنبوبة ذات طرف مغلق ؟

الإجابة : الطول الموجي للنغمة الأساسية والتوافقيات التي يحدث عندها الرنين .

سؤال : ما هما الطول الموجى والتردد الأساسيان الجديدان ؟

الإجابة : $\lambda_1 = 4L$ و $f_1 = \frac{v}{4L}$

سؤال : أى توافقية تكون هى النغمة التوافقية الأولى فى هذه الحالة ؟

الإجابة : فى الأنبوبة المغلقة فى أحد الطرفين والمفتوحة فى الطرف الآخر يحدث الرنين عند التوافقيات الفردية فقط . إذن النغمة التوافقية الأولى هى التوافقية الثالثة ، $f_3 = 3v/4L = 3f_1$.

سؤال : ماذا يتغير عندما تكون الأنبوبة مملوءة بالأرجون بدلا من الهواء ؟

الإجابة : الكتلة الجزيئية وقيمة γ لأن الأرجون غاز أحادى الذرة .

الحل والمناقشة :

(أ) الطول الموجى الأساسى فى الجزء (أ) ببساطة هو :

$$\lambda_1 = 2L = 1.2 \text{ m}$$

والكتلة الجزيئية للهواء تساوى 28.8 kg/mol ؛ كما أن قيمة γ للهواء عند 20°C تساوى 1.4 . إذن :

$$v = \left(\frac{\gamma RT}{M}\right)^{1/2}$$

$$= [(1.4)(8314 \text{ J/kmol.K})(293 \text{ K})(28.8 \text{ kg/mol})]^{1/2} = 334 \text{ m/s}$$

ويمكن أيضًا استخدام العلاقة التقريبية (الجدول 1-15) :

$$v = 331 \text{ m/s} + 0.61\,T = 331 + 12.2 = 343 \text{ m/s}$$

(تذكر أن T فى هذه الصيغة مقدرة بالدرجات السيليزية) . إذن :

$$f_1 = v/\lambda_1 = \frac{343 \text{ m/s}}{1.20 \text{ m}} = 286 \text{ Hz}$$

ومن ثم فإن النغمة التوافقية الأولى هى $f_2 = 2f_1 = 572$ Hz .

(ب) حيث أن سرعة الصوت لا تتغير فى هذه الحالة ، إذن :

$$\lambda_1 = 4L = 2.40 \text{ m} \quad \text{و} \quad f_1 = \frac{343 \text{ m/s}}{2.40 \text{ m}} = 143 \text{ Hz}$$

هذا التردد يساوى نصف التردد الأساسى فى حالة الأنبوبة مفتوحة الطرفين .

أما النغمة التوافقية الأولى فتكون :

$$f_3 = 3\,f_1 = 3(143 \text{ Hz}) = 249 \text{ Hz}$$

وهكذا نرى أن نفس الأنبوبة لها توافقيات مختلفة تمامًا ، ويتوقف ذلك على ما كانت الأنبوبة مفتوحة أم مغلقة فى أحد طرفيها .

(جـ) وأخيرًا ، الكتلة الجزيئية فى حالة الهليوم تساوى 4 و 1.67 = γ ، ولهذا تكون سرعة الصوت فى الهليوم أعلى بدرجة كبيرة . ويمكن أيضًا استخدام طريقة النسب مع

مراعاة أن γ و M تكونان تحت علامة الجذر التربيعي :

$$v_{He} = v_{air}\sqrt{\left(\frac{1.67}{1.40}\right)\left(\frac{29}{4.0}\right)} = 2.94\ v_{air}$$

$$= (343\ m/s)(2.94) = 1010\ m/s$$

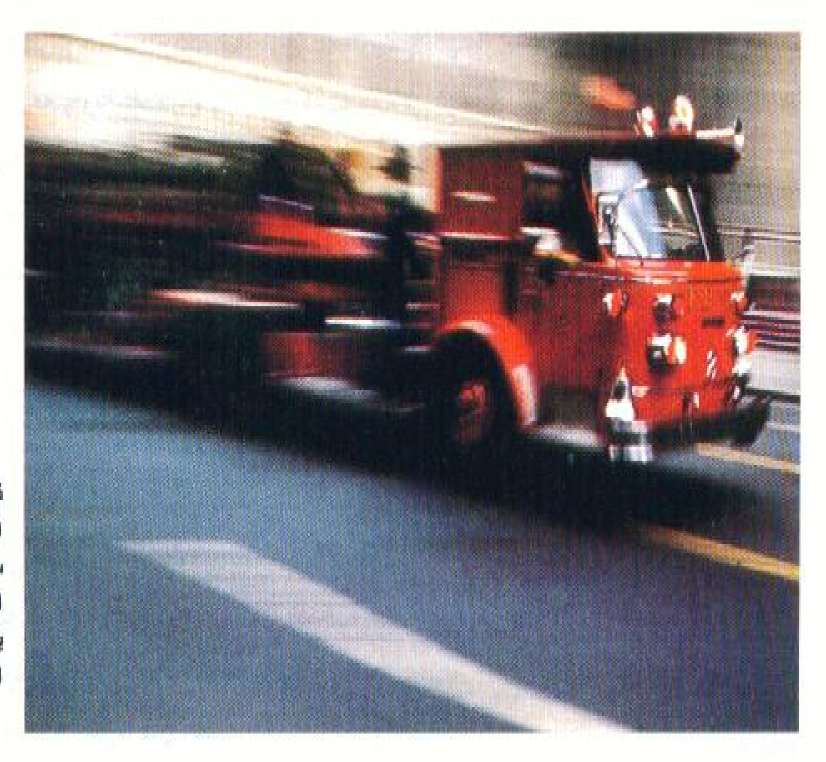
وحيث أن f يتناسب مع v ، وبملاحظة أن L يظل ثابتًا، إذن :

$$f_1(He) = \left(\frac{1010\ m/s}{343\ m/s}\right) f_1(air) = 2.94\, f_1(air) = 841\ H_z$$

وهذا التأثير للهليوم على سرعة الصوت هو السبب في أن الشخص الذى يتكلم بعد استنشاقه للهليوم مباشرة يصدر صوتًا ذا درجة عالية .

15-11 ظاهرة دوبلر

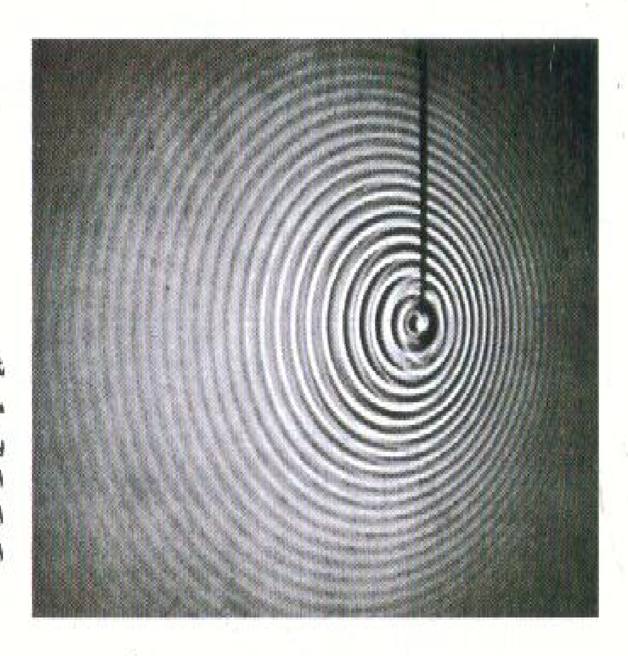
ننتقل الآن إلى ظاهرة مختلفة ولكنها عامة لجميع أنواع الموجات ، وللموجات الصوتية على وجه الخصوص ، وهى ظاهرة دوبلر* . ومن المؤكد أنك قد لاحظت هذه الظاهرة يومًا ما وإن لم تدرك سببها . فمثلاً ، عندما تتحرك سيارة إسعاف مقتربة منك بسرعة كبيرة ثم تتخطاك مبتعدة عنك يمكنك أن تلاحظ أن صوت صفارة الإنذار يسلك سلوكًا غريبًا . سوف يبدو لك أن نغمة الصفارة ترتفع أثناء اقترابها منك ثم تنخفض أثناء ابتعادها عنك . وهذا يعنى بأسلوب آخر أن تردد الصوت يرتفع عند اقتراب المصدر



تحدث ظاهرة دوبلر فى الموجات الصوتية عندما تمر بنا سيارة مطافئ سريعة ، إذ يلاحظ أن تردد الصوت المنبعث من صفارة الإنذار أو النفير ينخفض عندما يتغير اتجاه السيارة من الاقتراب منا إلى الابتعاد عنا .

* سميت الظاهرة بهذا الاسم نسبة إلى الفيزيائى النمساوى كريستيان جوهان دوبلر الذى أثبت فى عام 1842 ضرورة حدوث هذه الظاهرة فى حالة الموجات الصوتية والضوئية .

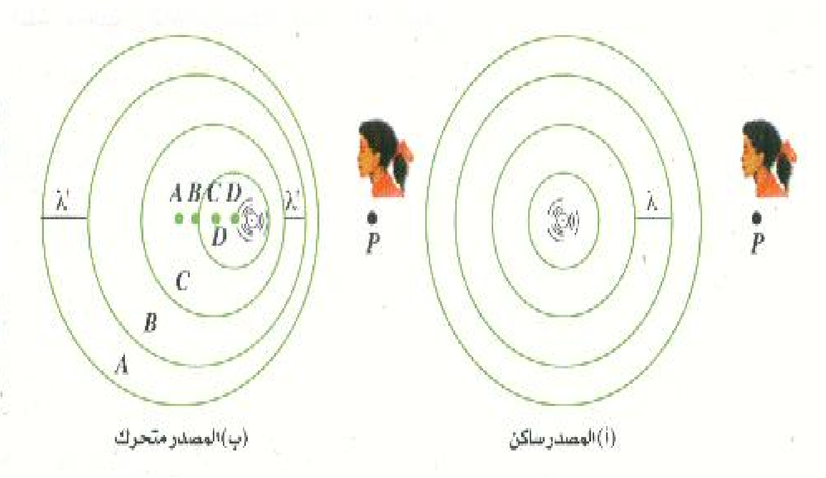
الصوتى منك وينخفض عند ابتعاده عنك . وتحدث ظاهرة مشابهة أيضًا في حالة الموجات الضوئية والموجات الكهرومغناطيسية كذلك فعندما تنعكس موجات الرادار على سيارة متحركة فإن ترددها يتزحزح بالنسبة إلى التردد الذى يرسله المصدر . ويعتمد مقدار الزحزحة الترددية على سرعة السيارة ، مما يمكن ضابط المرور من معرفة ما إذا كانت السيارة قد تعدت حد السرعة القانونية أم لا . وعمومًا فإن أى **حركة** نسبية بين مصدر الموجات مهما كان نوعها والشاهد لها تأثيرها على تردد هذه الموجات الذى يقيسه هذا المشاهد .



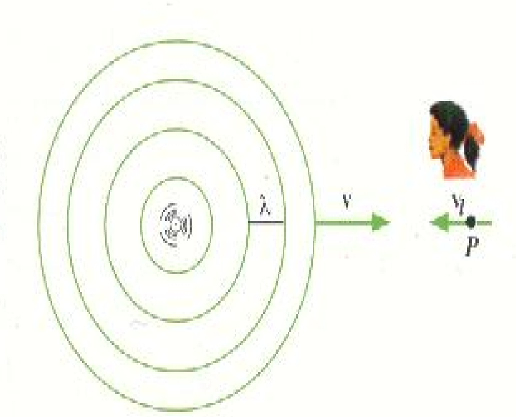
شكل 17-15:
موجات الماء المنبعثة من قضيب رأسى يهتز إلى أعلى وإلى أسفل . وحيث أن المصدر يتحرك إلى اليمين سوف يقل الطول الموجى للموجات المنتشرة في هذا الاتجاه (مركز تطوير التعليم) .

ويمكن فهم ظاهرة دوبلر بالرجوع إلى الشكل 17-15 الذى يوضح مصدرًا للموجات المائية يتحرك تجاه اليمين في الماء . فبالرغم من أن المصدر يرسل موجات دائرية إلا أن مراكز الدوائر المتتالية تتحرك إلى اليمين مع حركة المصدر ، وهذه الحركة تتسبب فى أن تصبح القمم الموجية أكثر قربًا من بعضها البعض على الجانب الأيمن للمصدر مما هى على الجانب الأيسر . وهكذا فإن حركة المصدر تؤدى في الواقع إلى اختلاف الطول الموجي للموجات في الاتجاهات المختلفة .

وتحدث ظاهرة مشابهة لذلك في حالة الموجات الصوتية ، وهذا ما يمكن أن نراه بالشكل 18-15 . فإذا كان المصدر ساكنًا وكان المشاهد ساكنًا أيضا عند النقطة P سوف تسمع الأذن ترددًا مماثلاً تمامًا لتردد المصدر f ، وهذا موضح بالشكل 18-15 أ . أما الشكل 18-15 ب فإنه يوضح ما يحدث عندما يكون المصدر متحركًا والمشاهد ساكنًا . في هذه الحالة سوف تسبب حركة المصدر اختلاف الطول الموجي للموجات المنبعثة منه فى الاتجاهات المختلفة . ونظرًا لأن حركة المصدر **لا** تؤثر على السرعة الموجية فإن تغير الطول الموجى سوف يؤدى إلى تغير تردد الصوت الذى يسمعه المشاهد الساكن . وبناء على التحليل السابق يمكننا أن نرى بسهولة أنه إذا كان المصدر متحركًا تجاه المشاهد فإن تردد الصوت المسموع سيكون أكبر من f ؛ وإذا كان المصدر متحركًا مبتعدًا عن المشاهد سيكون التردد المسموع أصغر من f .



شكل 18-15:
يعتمد تردد الصوت الذى تسمعه الفتاة على سرعة كل من المصدر والفتاة . الجزء (ب) يمثل حالة حركة المصدر إلى اليمين عندما يكون المشاهد ساكنًا . وعندما يكون المصدر فى النقطة A فإنه يرسل القمة الموجية المميزة بالحرف A ، وعندما يكون فى B فإنه يصدر القمة الموجية B ، وهكذا .



شكل 19-15:
تصل الموجات إلى المشاهد المقترب من المصدر بسرعة نسبية قدرها $v + v_l$. وعندما يتحرك المشاهد مبتعدًا عن المصدر تكون السرعة النسبية للموجات $v - v_l$.

ويختلف الموقف عندما يكون المشاهد متحركًا بالنسبة إلى مصدر ساكن ، كما هو مبين بالشكل 19-15 . فإذا كان المشاهد متحركا تجاه المصدر فإنه سوف يستقبل عددًا من الجبهات الموجية كل ثانية أكبر من العدد المنبعث بالفعل من المصدر خلال نفس الزمن ؛ أى أن المشاهد سوف يسمع ترددًا أعلى من f . وبالمثل ، عندما يتحرك المشاهد مبتعدًا عن المصدر سوف تستقبل أذنه عددًا أقل من الجبهات الموجية فى الثانية الواحدة ، وبذلك سوف يقيس المشاهد ترددًا أقل من f .

ويمكن تلخيص هذه الظاهرة وصفيًا كما يأتى :

يزداد تردد الصوت المقاس عندما يقترب المصدر والمشاهد أحدهما من الآخر ويقل عندما يبتعد أحدهما عن الآخر .

وكما أشرنا سابقًا فإن هذه الظاهرة تنطبق على جميع أنواع الموجات وليس على الموجات الصوتية فقط .

لنحاول الآن فحص ظاهرة دوبلر كميًا . يمكننا أن نرى من الشكل 18-15 ب أن المسافة بين قمتين موجبتين متتاليتين متحركتين فى اتجاه المشاهد **تقصر** بمقدار يساوى المسافة المقطوعة بواسطة المصدر خلال الزمن اللازم لانبعاث الجهتين الموجيتين المناظرتين . ولكن هذا الزمن يساوى دورة الموجات T ؛ وعليه فإن الطول الموجى الفعال المقاس يكون :

$$\lambda' = \lambda - v_s T$$

حيث v_s سرعة المصدر . وبالمثل ، عندما يكون المصدر **مبتعدًا** عن المشاهد بسرعة قدرها

v_s سوف تستطيل المسافة بين كل قمتين موجيتين متتاليتين بمقدار $v_s T$ ، وهذا يعطى :

$$\lambda' = \lambda + v_s T$$

وباستخدام العلاقتين $\lambda = v/f$ و $T=1/f$ نجد أن :

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f} \pm \frac{v_s}{f}$$

أو :

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s} \quad \text{(للمصدر المتحرك)} \qquad (15\text{–}8)$$

حيث v سرعة الموجات في الوسط ، بينما تنطبق الإشارة الموجبة في حالة ابتعاد المصدر عن الشاهد ، وتنطبق الإشارة السالبة في حالة اقتراب المصدر من المشاهد .

لنفترض الآن أن المشاهد متحرك بسرعة أقل من سرعة الصوت مقدارها v_l . في هذه الحالة ستكون السرعة النسبية بين المشاهد والموجات $v + v_l$ عندما يكون المشاهد متحركًا **تجاه** المصدر ، وهذا هو الموقف المبين بالشكل 19–15 . أما إذا كان المشاهد متحركًا **مبتعدًا** عن المصدر فستكون السرعة النسبية $v - v_l$. معنى ذلك أن دورة الموجة لن تكون λ/v ، بل ستكون :

$$T' = \frac{1}{f'} = \frac{\lambda}{v \pm v_l} = \frac{v/f}{v \pm v_l}$$

ومن ثم :

$$f' = f\frac{v \pm v_l}{v} \quad \text{(للمشاهد المتحرك)} \qquad (15\text{–}8)$$

حيث تعني الإشارة السالبة هنا أن الحركة **تجاه** المصدر ، بينما تنطبق الإشارة الموجبة عندما يتحرك المشاهد **مبتعدًا** عن المصدر . وإذا التبس عليك الأمر فيما يتعلق بالإشارة الجبرية اللازم استخدامها في موقف معين فعليك أن تتذكر القاعدة العامة السابق ذكرها . ومن المهم أيضًا ألا تنسى أن المعادلتين 7–15 و 8–15 تعطيان زحزحتين ترددتين **مختلفين** لنفس السرعة ، ويتوقف ذلك على ما إذا كان الشيء المتحرك هو المصدر أم المشاهد .

ومع ذلك فقد أثبت أينشتين أن المعادلتين 7–15 و 8–15 غير صحيحتان في حالة الموجات الضوئية عندما يكون المصدر أو الشاهد متحركًا بسرعة قريبة من سرعة الضوء . وتنشأ هذه الصعوبة بسبب نظرية النسبية التي تنص على أن سرعة الضوء في الفراغ لا تعتمد على حركة المشاهد أو المصدر الضوئي . وتكون الزحزحة الترددية في مثل تلك الحالات فائقة السرعة واحدة سواء كان المتحرك هو المصدر أو المشاهد .

مثال 5-15 :

تتحرك سيارة في يوم شتاء بارد $T = 0°C$ في طريق مستقيم بسرعة قدرها 20.0 m/s وهي تطلق صوت نفيرها وتردده 500 Hz . لنفرض أنك تقف على أحد جانبي هذا

الطريق . ما هو التردد الذى تسمعه أذناك (أ) إذا كانت السيارة تتحرك مقتربة منك ؟ (ب) عندما تتحرك السيارة مبتعدة عنك ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة دوبلر التى تنطبق على هذا الموقف ؟

الإجابة : الشاهد ، وهو أنت ، ساكن . إذن ، تنطبق المعادلة (7–15) على هذا الموقف مع استعمال الإشارة السالبة فى الجزء (أ) والموجبة فى الجزء (ب) .

سؤال : ما قيمة سرعة الصوت v ؟

الإجابة : بالرجوع إلى الجدول 1–15 نجد أن سرعة الصوت عند درجة 0°C تساوى 331 m/s .

الحل والمناقشة : بالنسبة للجزء (أ) :

$$f' = 500\ \text{Hz}\left(\frac{331\ \text{m/s}}{331\ \text{m/s} - 20.0\ \text{m/s}}\right)$$

$$= 550\ \text{Hz}\ \frac{331}{311} = 532\ \text{Hz}$$

وبالنسبة للجزء (ب) :

$$f' = 500\ \text{Hz}\left(\frac{331\ \text{m/s}}{331\ \text{m/s} + 20.0\ \text{m/s}}\right)$$

$$= 550\ \text{Hz}\ \frac{331}{351} = 472\ \text{Hz}$$

وهذا الفرق فى التردد 60 Hz = 472 − 532 الذى تلاحظه عندما تعبرك السيارة فرق واضح جداً .

تمرين : أوجد الترددين اللذين تسمعهما عندما تتحرك (أ) مقترباً من ، (ب) مبتعداً عن نفير ساكن بسرعة مقدارها 20.0 m/s إذا كان تردد الصوت المنبعث من النفير 500 Hz .

الإجابة : فى حالة الاقتراب $f' = 530$ Hz ، وفى حالة الابتعاد $f' = 470$ Hz .

مثال 6-15 :

تتحرك سيارة تجاهك بسرعة مقدارها v_s وبها مجهار تنبعث منه نغمة ترددها 440 Hz . وبينما كانت السيارة تقترب منك قمت أنت بتشغيل مصدر صوتى مماثل يصدر نغمة ترددها 440 Hz أيضاً ، فسمعت 20 ضربة لكل ثانية بين مصدرك الصوتى والمصدر الموجود بالسيارة . بأى سرعة تتحرك السيارة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين تردد الضربات وسرعة السيارة ؟

الإجابة : إذا كانت السيارة ساكنة لابد أن يتساوى تردد كل من النغمتين . وحيث أن السيارة متحركة ، فإن التردد الذى تسمعه من مجهارها يكون مزحزحًا نتيجة لظاهرة دوبلر ، وهذا التردد المزاح هو الذى يكون الضربات مع مصدرك .

سؤال : ماذا تمثل الضربات العشرية فى الثانية ؟

الإجابة : إنها تمثل الفرق بين تردد مصدرك f وتردد دوبلر المزحزح f' :

$$f' - f = \text{تردد الضربات} \qquad (1)$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تعطى قيمة f' ؟

الإجابة : المعادلة (15-7) لأن السيارة تقترب منك ، مع استعمال الإشارة السالبة :

$$f' = f\frac{v}{v - v_s} \qquad (2)$$

سؤال : ما هى المعادلة التى نحصل عليها مع العلاقتين (1) و (2) ؟

الإجابة :

$$20\ \text{Hz} = f' - f = f\frac{v}{v - v_s} - f$$

لاحظ أن سرعة السيارة v_s هى المجهول الوحيد فى المعادلة لأن f معلوم ولأن $v = 343\ \text{m/s}$ عند $20°\text{C}$.

الحل والمناقشة : يتطلب الحل بعض المناورات الجبرية البسيطة :

$$20\ \text{Hz} = 440\ \text{Hz}\ \frac{343\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s} - v_s} - 440\ \text{Hz}$$

بأخذ الحد 400 Hz معامل مشترك :

$$20\ \text{Hz} = 440\ \text{Hz}\left(\frac{343\ \text{m/s}}{343\ \text{m/s} - v_s} - 1\right)$$

وبقسمة كلا الطرفين على 20 Hz وإجراء عملية الطرح داخل القوسين نحصل على :

$$1 = 22\frac{v_s}{343\text{m/s} - v_s}$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى v_s نجد أن :

$$22v_s = 343\ \text{m/s} - v_s \qquad v_s = \frac{343\text{m/s}}{23} = 15\ \text{m/s}$$

15-12 السرعة فوق الصوتية

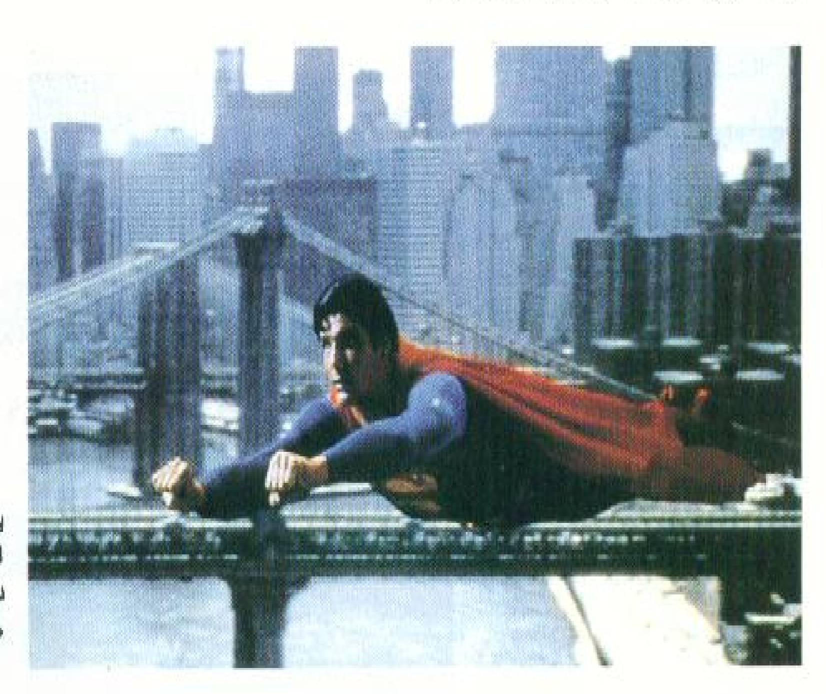
تحدث ظاهرة غريبة عندما تقترب سرعة المصدر الصوتى من سرعة الصوت أو تصبح مساوية لها . فى هذه الحالة سوف نجد من المعادلة (15-7) أن تردد الصوت f' يقترب

من ما لانهاية ، وهذا يعني ببساطة أن عددًا لا نهائيًا تقريبًا من القمم الموجية سوف يصل إلى المشاهد في وقت قصير جدًا . ويمكننا أن نفهم هذا بسهولة بالرجوع إلى الشكل 15-18 ب مرة ثانية .

لنفرض أن سرعة المصدر الصوتي تساوي سرعة الصوت . في هذه الحالة سوف تقع جميع القمم الموجية الموجودة أمام المصدر فوق بعضها البعض ، مما يؤدى إلى تركيز الطاقة الموجية في منطقة صغيرة جدًا أمام المصدر . وإذا تذكرنا أن الموجة التضاغطية يمكنها أن تتحرك في الهواء بسرعة الصوت v فقط ، يمكننا أن نفهم ما يحدث في الحالة التالية . عندما تتحرك طائرة في الهواء بسرعة أعلى من سرعة الصوت v ، سوف يتحرك التضاغط الهوائي الناتج من الطائرة إلى الخارج بسرعة مقدارها v ؛ ويوضح الشكل 15-20 أ موضع هذا التضاغط في لحظات متتالية . وعندما تتحرك الطائرة من A إلى B إلى C إلى D بالسرعة v_p يتحرك التضاغط الناتج عنها إلى الخارج بسرعة أبطأ قدرها v لتصل إلى المواضع المناظرة A' و B' و C' و D' . ومن ثم فإن الجبهة الموجية للتضاغط سوف تصنع زاوية قدرها θ مع اتجاه سرعة الطائرة ، حيث :

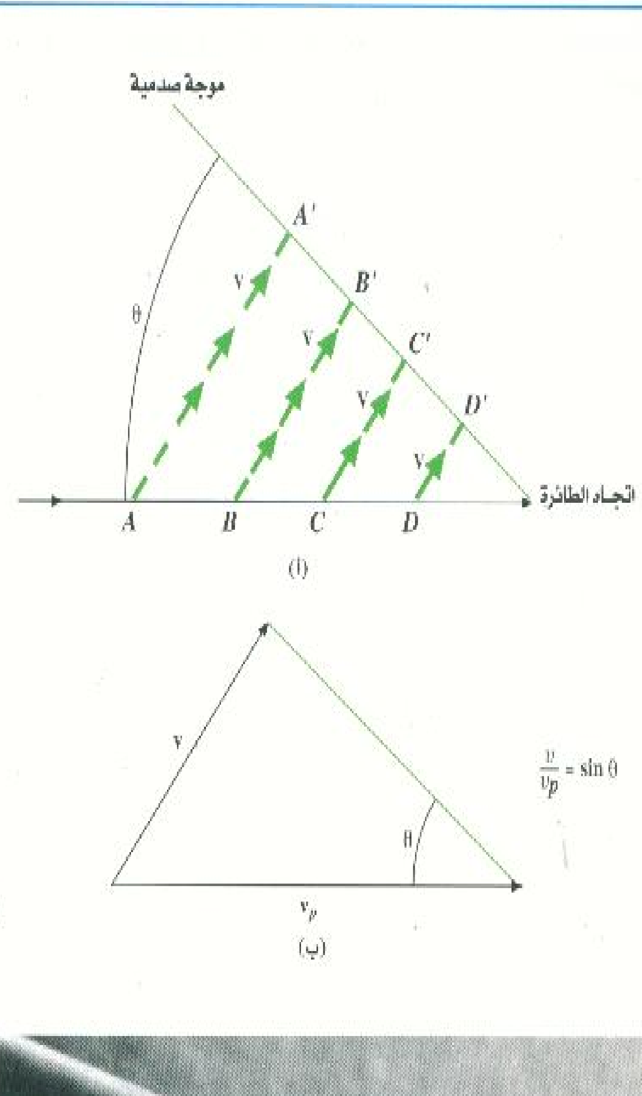
$$\sin \theta = \frac{v}{v_p}$$

وهذه الزاوية موضحة بالشكل 15-20 ب .



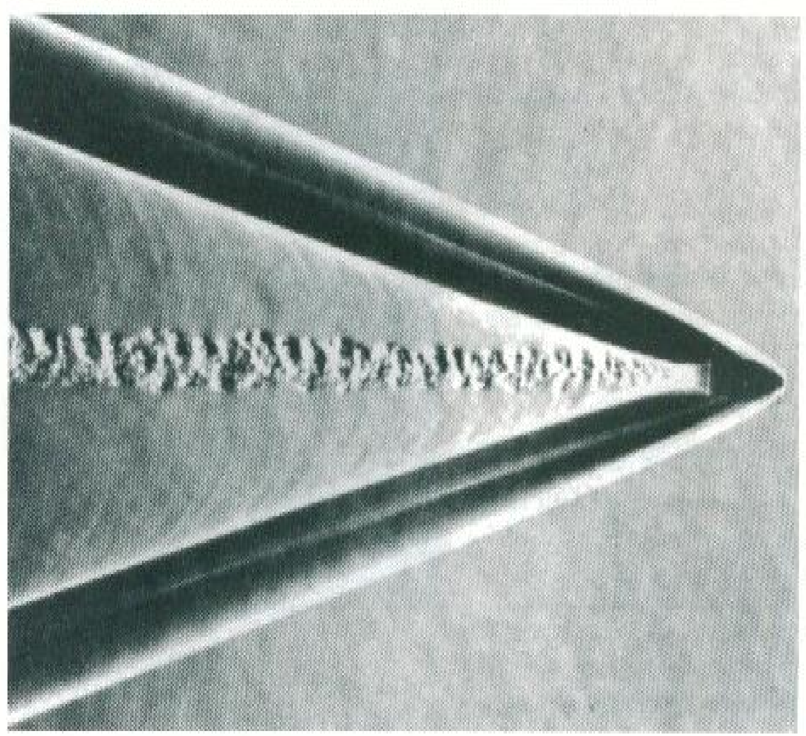
يبدو أن السوبرمان لا يتأثر بقوانين الفيزياء ، إذ أنه لا يولد موجة صدمية أو دوى اختراق حاجز الصوت أثناء طيرانه « بسرعة أعلى من طلقة نارية متسارعة » .

وتتحرك الموجة التضاغطية في الواقع في ثلاثة أبعاد ، مولدة بذلك موجة مخروطية كالمبينة بالشكل 15-21 . وتسمى هذه المنطقة من الطاقة الصوتية المكثفة جدًا **بالموجة الصدمية** ، وهي تسبب دويًا هائلاً عند مرورها بأي نقطة كالنقطة B في الشكل 15-21 . ويتحرك **دوى اختراق حاجز الصوت** هذا على الأرض بسرعة تساوي سرعة الطائرة . ويلاحظ وجود فرق كبير في ضغط الهواء عبر الموجة الصدمية . وحيث أن



شكل 15-20:
(أ) تكون الموجة الصدمية . (ب) العلاقة بين سرعة الصوت v وسرعة الطائرة v_p .

شكل 15-21:
ضرب دوى اختراق حاجز الصوت النقطة C في لحظة سابقة ، وهو يمر الآن بالنقطة B متجهًا إلى C .



شكل 15-22:
الموجات الصدمية التى تولدها رصاصة منطلقة فى الهواء .

الموجة الصدمية هى منطقة من الطاقة الصوتية المكثفة جدًا فإنها يمكن أن تسبب دمارًا شديدا لأى شيء تصطدم به ؛ وتتوقف التأثيرات التدميرية بالطبع على شدة الموجة الصدمية . ويكون هذا التدمير شديدًا بوجه خاص عند طيران الطائرات فوق الصوتية

على ارتفاعات منخفضة ، حيث لا تجد طاقة الموجة الصدمية الفرصة لتشتتها قبل ضربها للأرض .

لاحظ أن الزاوية θ تقل بزيادة سرعة الطائرة . وتعرف النسبة بين سرعة الطائرة وسرعة الصوت v_p/v **بالعدد الماخي (Mach number)** .

$$\text{Mach number} = \frac{v_p}{v} = \frac{1}{\sin\,\theta}$$

ويقال أن الطائرة تتحرك بسرعة قدرها Mach 2 إذا كانت سرعتها ضعف سرعة الصوت .

هذا ويمثل الشكل 15–22 الموجة الصدمية التي تولدها رصاصة عالية السرعة في الهواء .

هل يمكنك إثبات أن هذه الرصاصة تتحرك بسرعة قدرها Mach 3 تقريبًا بقياس زاوية الموجة الصدمية في الصورة ؟

أهداف التعليم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الموجة الصوتية ، (ب) التضاغط ، (جـ) الجبهة الموجية ، (د) الشعاع ، (هـ) الموجة المستوية ، (و) الموجة الكروية ، (ز) شدة الصوت ، (ح) مستوى الشدة ، (ط) الديسيبل ، (ى) قانون التربيع العكسي ، (ك) الصوت تحت السمعي والصوت فوق السمعي ، (ل) التداخل البنائي والهدمي ، (م) نوعية الصوت ، (ن) الضربات وتردد الضربات ، (س) التوافقيات والنغمات التوافقية ، (ع) ظاهرة دوبلر ، (ف) الموجة الصدمية ، (ص) العدد الماخي .

2 ـ شرح ما هي الموجة الصوتية ولماذا لا يمكن أن ينتقل الصوت في الفراغ .

3 ـ ذكر القيمة التقريبية لسرعة الصوت في الهواء عند درجتي 0°C و 20°C حساب سرعة الصوت في الغازات المختلفة عند درجات حرارة معينة .

4 ـ حساب النقص في شدة الصوت المنبعث من مصدر نقطي كدالة في المسافة .

5 ـ تحويل شدة الصوت بالواط لكل متر مربع إلى مستوى الصوت (مستوى الشدة) بالديسيبل . تحويل مستوى الصوت بالديسيبل إلى شدة الصوت .

6 ـ رسم شكل تخطيطي تقريبي لاستجابة الأذن العادية كدالة في التردد . ذكر القيم التقريبية لمستوى الشدة بالديسيبل للأصوات الضعيفة جدًا والقوية جدًا . تحديد المنطقة فوق السمعية .

7 ـ شرح ما هي نوعية الصوت ولماذا تختلف عن التردد .

8 ـ إيجاد محصلة موجتين متساويتي التردد والسعة ولكنهما مختلفين في الطور للحصول على التداخل البنائي أو الهدمي أو الحصول عليهما معًا .

9 ـ استخدام ظاهرة الضربات لإيجاد الفرق بين ترددي مصدرين صوتيين .

10 ـ إيجاد الترددات الرنينية للصوت في أنابيب الرنين .

11 ـ شرح ظاهرة دوبلر وحساب زحزحة دوبلر في حالة المصدر المقترب والمتباعد .

12 ـ شرح كيف تتولد الموجة الصدمية ولماذا ينشأ دوى اختراق حاجز الصوت .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

سرعة الصوت

الموجات الصوتية هى موجات طولية (تضاغطية) . تعطى سرعة الصوت فى أى وسط بالعلاقة :

$v = \sqrt{Y/\rho}$ (للوسط أحادى البعد)

$v = \sqrt{B/\rho}$ (للوسط ثنائى البعد أو ثلاثى البعد)

حيث Y معامل يونج للوسط ، B معامل المرونة الحجمى للوسط ، ρ كثافة الوسط .

تعطى سرعة الصوت فى الغازات المثالية بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

خلاصة :

1 ـ تعتمد النسبة بين الحرارتين النوعيتين $\gamma = C_p / C_v$ على نوع الغاز ودرجة حرارته .

2 ـ $R = 8314$ J/kmol.K فى نظام الوحدات SI ، ومن ثم يجب أن يعبر عن M بالكيلو جرامات لكل مول وعن T بالدرجات المطلقة .

3 ـ $M = 28.8$ kg/kmol.K فى حالة الهواء . سرعة الصوت هى $v = 331$ m/s عند درجة 0°C وتقل بمعدل 0.61 m/s لكل درجة فوق درجات الحرارة العادية .

شدة الصوت (I)

$$\text{الشدة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} \quad \text{W/m}^2$$

تتناسب شدة الصوت المنبعث من مصدر نقطى تناسبًا عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر :

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}$$

حيث P خرج القدرة الكلية للمصدر ، r بعد النقطة التى تقاس فيها الشدة I .

مستوى الشدة أو مستوى الصوت (مقياس الديسيبل)

مستوى الشدة (أو مستوى الصوت) بالديسيبل هو $(\text{dB}) = 10 \log (I/I_0)$.

خلاصة :

1 ـ « مستوى الصوت » أو « مستوى الشدة » مصطلحان يعودان على نفس الظاهرة .

2 ـ يقع مبدى السمع عند $I_0 = 10^{-12}$ W/m² . وتؤخذ هذه القيمة عادة باعتبارها نقطة الصفر على مقياس مستوى الشدة بالديسيبل .

3 ـ الديسيبل عدد لا بعدى .

التداخل بين مصدرين صوتيين : الضربات

الضربات هى تغيرات دورية فى سعة الموجة المحصلة الناتجة عن تراكب موجتين من مصدرين صوتيين مختلفى التردد f و f' .

تردد الضربات يساوى الفرق بين ترددى الموجتين .

$$\text{تردد الضربات} = f' - f$$

شروط الرنين الصوتى فى الأعمدة الـهوائية

تحدث الموجات المستقرة (الرنين) فى عمود هوائى طوله L عند الأطوال الموجية والترددات الآتية :

1 ـ فى حالة العمود الـهوائى المغلق عند أحد طرفيه والمفتوح عند الطرف الآخر :

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{4L}$$

حيث n عدد صحيح فردى موجب .

2 ـ فى حالة العمود الـهوائى مفتوح الطرفين

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{2L}$$

حيث n أى عدد صحيح موجب .

خلاصة :

1 ـ فى كلتا الحالتين $n = 1$ تسمى **التوافقية الأساسية** ، وهى تمثل حالة أكبر طول موجى وأصغر تردد .

2 ـ يسمى كل تردد تال أعلى **نغمة توافقية** . ويسمى العدد n العدد **التوافقى** للرنين . ترن الأنبوبة المفتوحة عند أحد الطرفين والمغلقة عند الطرف الآخر عند التوافقيات الفردية فقط . أما الأنبوبة مفتوحة الطرفين فترن عند التوافقيات الفردية والزوجية .

ظاهرة دوبلر

تحدث ظاهرة دوبلر طالما كان المصدر الصوتى والمشاهد متحركين حركة نسبية أحدهما بالنسبة إلى الآخر .

يزداد التردد المقاس (أو المسموع) عندما يقترب المصدر والمشاهد أحدهما من الآخر ، ويقل عندما يبتعد أحدهما عن الآخر . يرتبط التردد المشاهد f' بتردد المصدر f تبعا للعلاقة :

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s} \qquad \text{(للمصدر المتحرك)}$$

$$f' = f\frac{v \pm v_l}{v} \qquad \text{(للمشاهد المتحرك)}$$

حيث v سرعة الصوت ، v_s سرعة المصدر ، v_l سرعة المشاهد .

خلاصة :

1 ـ تختار الإشارة الجبرية بما يتفق مع الوصف الكمى السابق .

2 ـ يفترض أن كلاً من v_s و v_l أصغر من v فى كلتى الحالتين .

السرعة فوق الصوتية : العدد الماخى

تتولد الموجة الصدمية عندما تزيد سرعة الجسم v_p عن سرعة الصوت v . تصنع الموجة الصدمية زاوية مخروطية θ مع اتجاه حركة الجسم ، حيث :

$$\sin\theta = v / v_p$$

$$\frac{v_p}{v} = \text{Mach number} = \frac{1}{\sin\theta}$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ اشرح لماذا لا يمكن سماع صوت جرس يدق داخل غرفة مفرغة بالخارج .

2 ـ هل تتوقع أن يكون تردد الصوت المسموع تحت الماء مساويًا لتردد الصوت المسموع فى الهواء إذا كان المصدران متماثلين تمامًا ؟ اشرح .

3 ـ عندما يستنشق شخص غاز الهليوم ثم يتكلم بعد ذلك مباشرة فإن درجة صوته تكون أعلى . اشرح .

4 ـ لنفرض أن مجموعة من أنابيب الأرغن قد ركبت بالقرب من سخان ساخن . هل يؤثر ذلك على عمل الأرغن ؟ اشرح .

5 ـ يمكن عمل صفارة إنذار (سرينة) بثقب مجموعة من الفتحات على أبعاد متساوية في دائرة متمركزة مع قرص معدني صلب . وعندما تدور هذه الدائرة أثناء اندفاع تيار هوائي عليها بالقرب من الفتحات تنبعث منها نغمة شبيهة بصفارة الإنذار . اشرح كيف يعطي ذلك إحساسًا بالصوت للأذن ، واذكر العوامل التى تؤثر على درجة ونوعية الصوت .

6 ـ يدعى مغنى أنه يستطيع تحطيم كأس نبيذ بأن يغنى نغمة معينة . هل يمكن أن يكون هذا صحيحًا ؟ اشرح .

7 ـ افترض أن نوعًا من الكائنات البشرية يعيش على كوكب بعيد ، وأن أجهزتها السمعية مصممة كالتالى . تبدو رؤوس هذه الكائنات من الخارج كرؤوسنا نحن سكان الأرض . ومع ذلك فإن الأذنين متصلتان إحداهما بالأخرى عن طريق قناة صلبة الجدار ذات مقطع دائرى قطره 1 cm . ويقع فى منتصف هذه القناة غشاء دائرى رقيق يعمل كجلدة الطبلة ويقسمها إلى نصفين متساويين ؛ وينتج الإحساس السمعي لدى هذه الكائنات عند اهتزاز هذا الغشاء . ما الذى يمكنك أن تستنتجه عن القدرات السمعية لهذه الكائنات وعن طرق الاتصال الشفهى بينها ؟

8 ـ قناة الأذن هى أنبوبة مجوفة تصل ما بين الأذن الخارجية وطبلة الأذن ، وطول هذه القناة فى الشخص البالغ حوالى 2.5 cm . إلى أى حد يتفق التردد الرنينى لهذه القناة مع منحنى حساسية الأذن ؟

9 ـ قدر الترددات الرنينية لأنبوبة اختبار طولها 15 cm فى حالة النفخ عبر حافتها .

10 ـ ينبعث صوت تردده 1000 Hz من مصدر صوتي في جميع الاتجاهات أثناء هبوب ريح قوية على المصدر اتجاهه نحو الشرق . كيف يعتمد التردد والسرعة والطول الموجى للصوت المسموع على موضع المشاهد ؟

11 ـ مجهاران متصلان بجهاز استريو . وتقول تعليمات تشغيل الجهاز « ضع المجهارين جنبًا إلى جنب ووصل السلكين الأحمرين من المكبر إلى الطرفين الموجودين بظهر أحد المجهارين ، ثم وصل السلكين الرماديين من المكبر إلى الطرفين الموجودين بظهر المجهار الآخر واستمع إلى الصوت . اعكس وضع السلكين الأحمرين عند المجهار بحيث يصبح السلك الذى كان متصلاً بالطرف الأيسر للمجهار متصلاً بالطرف الأيمن ، والعكس بالعكس ، ثم استمع إلى الصوت مرة أخرى . اختر طريقة التوصيل النهائى بحيث تحصل على أقوى صوت » . اشرح الأسباب الفيزيائية لهذه التعليمات .

مسائل

(اعتبر أن سرعة الصوت فى الهواء 343 m/s ما لم ينص على غير ذلك)

القسم 3-15

1 ـ سمع صوت الرعد بعد زمن قدره 5.5 s من رؤية وميض البرق . على أى بعد حدث البرق ؟ افترض أن بالإمكان إهمال الزمن الذى يستغرقه الضوء للوصول إلى المشاهد ، وذلك لأن سرعة الضوء (3×10^8 m/s) أكبر كثيرًا من سرعة الصوت .

2 ـ يسمع الصوت الصادر من مدق الخوازيق بعد اصطدام المدق بالخازوق بزمن محسوس . ما مقدار هذا التأخر الزمنى إذا كان بعد المشاهد عن مدق الخوازيق 630 m ؟ اعتبر أن سرعة الصوت مهملة بالنسبة إلى سرعة الضوء كما فعلت فى المسألة 1 .

3 ـ يهتز وتر جيتار بتردد قدره 530 Hz . ما هو الطول الموجي للصوت المنبعث من الوتر ؟ كرر ذلك بالنسبة للترددين 180 Hz و 1550 Hz .

4 ـ تحدد الخفافيش مواضع الأشياء في الظلام بإرسال صوت ذي تردد فوق سمعي قدره 57 kHz وملاحظة كيفية انعكاسه على الأشياء . ما هو الطول الموجي المناظر ؟ وإذا كان الطول الموجي للصوت المنبعث من الخفاش 1.33 mm ، فما قيمة تردد هذا الصوت ؟

5 ـ استخدم المعادلة المذكورة في حاشية الجدول 1-15 لحساب سرعة الصوت في غاز النيتروجين عند درجة 20°C .

6 ـ استخدم المعادلة (4-15) لحساب سرعة الصوت في الهواء عند درجتي 0°C و -20°C . اعتبر أن الكتلة الجزيئية للهواء 29 . كرر ذلك بالنسبة إلى غاز الهليوم .

7 ـ استخدم قيمة معامل المرونة الحجمية للزئبق لإيجاد سرعة الصوت في هذه المادة .

8 ـ احسب معامل المرونة الحجمية للألنيوم باستخدام كثافة الألنيوم والبيانات المعطاة بالجدول 1-15 .

9 ـ سرعة الصوت في العظم 3455 m/s عندما يكون تردده 1 MHz ، وكثافة العظم حوالى $1.85\ g/cm^3$. احسب معامل المرونة الحجمية للعظم عند هذا التردد .

10 ـ ما هو التغير المئوي في سرعة الصوت في الهواء إذا تغيرت درجة حرارته بمقدار 1°C من 20°C إلى 21°C .

11 ـ يرسل مسبار الأعماق في سفينة صيد الأسماك موجات صوتية في الماء إلى أسفل ثم يستقبل الموجات المنعكسة . وقد اكتشف هذا الجهاز وجود قطيع من الأسماك على عمق 3.85 m تحت السفينة مباشرة ، وكانت درجة حرارة الماء في تلك اللحظة 20°C . (أ) ما هو الزمن المار بين إرسال الموجة الصوتية واستقبالها بعد انعكاسها على قطيع الأسماك ؟ (ب) لكي يمكن إيجاد المسافة يجب أن يستقبل الجهاز النبضة الموجية المنعكسة قبل إرسال النبضة التالية . ما هو أعلى تردد يمكن أن ترسل بها النبضات حتى يمكن كشف هذا القطيع المائي ؟ هل يجب أن يزيد تردد إرسال النبضات أم يقل إذا أريد كشف قطيع مائي على أعماق أقل من ذلك ؟

■ 12 ـ ذهبت أنت وصديقتك ذات مساء للتمشي على خط السكة الحديد ، ورأيتما فرقة من العمال يقومون بإصلاح القضبان على مسافة معينة منكما . وضعت صديقتك أذنها على القضيب الحديدي بعد اتفاقكما على أن تعطيك إشارة عند سماعها لطرقة المطرقة على القضيب وأنت واقف بجانبها ، فلاحظت أنك تسمع ضربة المطرقة في الهواء بعد 2.56 s من إشارتها . على أي بعد توجد فرقة العمال منكما ؟

القسمان 4-15 و 5-15

13 ـ يستهلك نظام استريو الطاقة بمعدل قدره 75 W . ويحتوي هذا النظام على مجهارين يخرج الصوت من كل منهما من مساحة قدرها $50\ cm^2$. فإذا كانت القدرة الصوتية الخارجة من كل مجهار 0.085 W ، فما هي شدة الصوت عند كل مجهار ؟ ما هي كفاءة النظام في تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة صوتية ؟

14 ـ مجهار معين ذو فتحة دائرية مساحتها $52\ cm^2$ ، ولنفرض أن الصوت ينبعث إلى الخارج انبعاثًا منتظمًا خلال الفتحة كلها . فإذا كانت شدة الصوت عند الفتحة $4.35 \times 10^{-4}\ W/m^2$ ، فما مقدار القدرة المنبعثة على هيئة صوت ؟

■ 15 ـ حزمة صوتية شدتها $4.25 \times 10^{-6}\ W/m^2$. ما هو مستوى الشدة بالديسيبل ؟

■ 16 ـ ما قيمة مستوى الشدة بالديسيبل لصوت شدته $0.55\ W/m^2$ ؟

■ 17 ـ (أ) صوت مستوى شدته 33 dB ، ما هي شدة هذا الصوت ؟ (ب) إذا كان مستوى الصوت 33 dB بالقرب من مجهار مساحته $90\ cm^2$ ، فما هي كمية الطاقة الصوتية الخارجة من المجهار في كل ثانية ؟

■ 18 ـ يعمل ثمانية أشخاص على آلاتهم الكاتبة في غرفة واحدة ويسببون حدوث ضوضاء بها مستوى شدتها المتوسط 56 dB . ماذا سيكون مستوى الشدة بالغرفة عندما يبدأ ثلاثة أشخاص إضافيين في الطرق على آلاتهم الكاتبة ، بفرض أن كلاً منهم يصدر نفس كمية الضوضاء ؟

■ 19 ـ مستوى الصوت في غرفة يتحدث بها 35 شخصًا يساوي 63 dB . كم شخصًا يلزم خروجهم من الغرفة لكي ينخفض مستوى الصوت بها إلى 57 dB ؟ افترض أن كلاً من هؤلاء الناس يتكلم بنفس الشدة كالآخرين .

■■ 20 ينبعث الصوت من مصدر صوتي صغير بانتظام في جميع الاتجاهات . فإذا كانت الشدة 3.5×10^{-3} W/m² على بعد 5.2 من المصدر ، (أ) ما هو مقدار الطاقة الصوتية المنبعثة من المصدر في كل ثانية ؟ (ب) ما قيمة الشدة على بعد 2.0 m من المصدر ؟

■ 21 ـ ما هي شدة الصوت في مكان مستوى الصوت فيه 25 dB ؟

■ 22 ـ أوجد شدة الصوت في غرفة مستوى الشدة فيها 88 dB ؟

■ 23 ـ حزمة صوتية مساحة مقطعها 2.75 cm² ومستوى شدتها 105 dB . سقطت هذه الحزمة على لوح ممتص للصوت فامتصت فيه تمامًا . ما مقدار الطاقة المنتقلة إلى اللوح في زمن قدره 1 min ؟

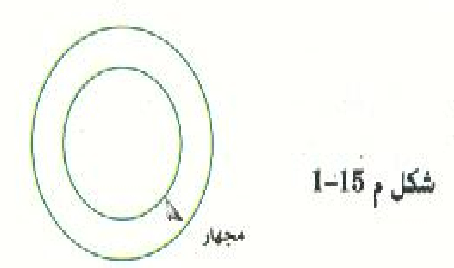
■■ 24 ـ زاد مستوى شدة صوت معين إلى 6 أضعاف فزادت شدته إلى خمسة أضعاف . ما هي الشدة الأصلية لهذا الصوت ؟

25 ـ مكبر صوتي في نظام استريو معين معامل كسبه 35 dB . ما هو معامل تكبير هذا المكبر للصوت الذي يستقبله ؟

■ 26 ـ قيس مستوى شدة الصوت المنبعث من مصدر صوتي متجانس صغير على بعد 45 m فوجد أنه 85 dB . ما هو خرج القدرة الكلي لهذا المصدر ؟

القسمان 8-15 و 9-15

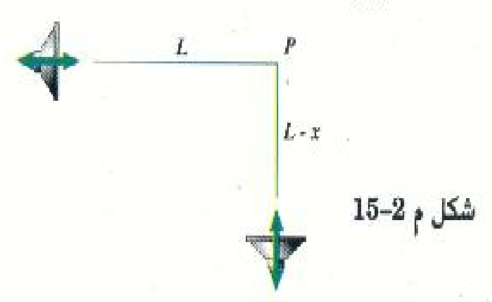
27 ـ وضع مجهار صغير في أنبوبة ملتوية على شكل دائرة ومملوءة بالهواء كما هو مبين بالشكل م 1-15 . فإذا كان نصف قطر الدائرة 1.35 m ، فما هي أصغر ثلاثة ترددات يمكنها أن تنتج صوتًا قويًا ؟ (لم يراع مقياس الرسم في هذا الشكل) .



شكل م 1-15

■ 28 ـ يرسل المجهار المبين بالشكل م 1-15 الصوت خلال الأنبوبة المجوفة على هيئة دائرة والمملوءة بالهواء . وتهتز هذه الأنبوبة اهتزازًا رنينيًا عند ترددات المجهار 66, 132, 198, 264 Hz بالإضافة إلى الترددات الأعلى . ما هو طول محيط الدائرة ؟ افترض أن المجهار أصغر كثيرًا مما هو مبين بالشكل .

■ 29 ـ يهتز المجهاران المبينان بالشكل م 2-15 اهتزازًا متطاورًا بتردد قدره 3400 Hz . ما هي قيمة x التي يكون الصوت عندها (أ) جهيرًا عند النقطة P ؟ (ب) ضعيفًا عند النقطة P ؟



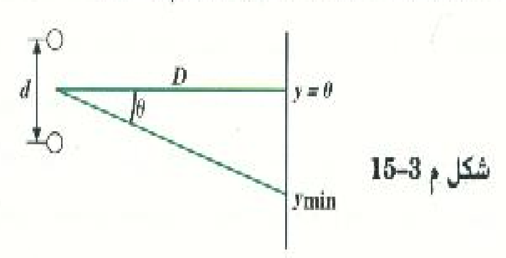
شكل م 2-15

30 ـ يهتز المجهاران المتماثلان الموضحات بالشكل م 2-15 اهتزازًا متطاورًا بنفس التردد ، حيث $L = 27.5$ cm أكبر من $L - x$. زيد تردد الموجات المنبعثة من المجهارين ببطئ ابتداء من 15 Hz . عد أي تردد يسمع مشاهد عند النقطة P (أ) أول أقصى جهارة ؟ (ب) أول أدنى جهارة ؟

31 ـ مجهاران صغيران يواجه أحدهما الآخر ، ويقع أولهما عند النقطة $x = 0$ ، ويقع الآخر عند النقطة $x = 4.6$ m . فإذا كان المجهاران يرسلان موجات صوتية متطاورة طولها الموجي 42 cm ، ففي أي النقط على استقامة الخط الواصل من $x = 0$ إلى $x = 4.6$ m يسجل مكشاف أضعف صوت ؟

32 ـ افترض موقفًا كالسابق وصفه في المسألة 31 مع استبدال المجهارين بمصدرين صوتيين متغيري التردد . فإذا بدأنا في تغيير التردد من الأدنى إلى الأعلى ، فعند أي الترددات يسمع الصوت ضعيفًا عند النقطة $x = 1.6$ m ؟

33 ـ يمثل الشكل م 4-15 مجهارين صغيرين جدًا (بحيث يمكن اعتبارهما مصدرين نقطيين) يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قدرها d ، ولنفرض أن مشاهدًا يقف عند الموضع $y = 0$ الذي يبعد مسافة قدرها D عن نقطة منتصف المسافة بين المجهارين . لنعتبر كذلك أن المجهارين يبعثان صوتين متطاورين تردد كل منهما 820 Hz . وحيث أن المشاهد يقف في الوضع $y = 0$ الذي يقع على نفس البعد من كل من المجهارين فإنه سوف يسمع الصوت بأقصى شدة . بدأ المشاهد الآن في الحركة على استقامة المحور y فوجد أن الشدة تصل إلى أقل قيمة لها عن الوضع y_{min} . (أ) أوجد y_{min} إذا كانت $D = 2.0$ m و $d = 1.0$ m . (ب) أوجد الزاوية θ في الشكل م 3-15 .



شكل م 3-15

34 ـ قارن عازف كمان النغمة الصادرة من أحد أوتار آلته بنغمة الوتر المقابل لكمان عازف آخر فلوحظ حدوث ضربات ترددها 1.3 Hz . فإذا كان تردد أحد الوترين 275 Hz ، فما هي الترددات الممكنة التي يهتز بها الوتر الآخر ؟

35 ـ تعزف آلتا بيانو نفس النغمة المدونة على النوتة الموسيقية ، ولكن تردد اهتزاز الآلة الأولى 320.4 Hz وتردد اهتزاز الثانية 321.1 Hz . ما هو تردد الضربات بين هاتين النغمتين ؟

القسم 10-15

36 ـ أنبوبة ذات طرف مغلق وآخر مفتوح طولها 76.4 cm . ما هي أقل ثلاثة ترددات ترن عندها هذه الأنبوبة ؟ ارسم شكل الموجة داخل الأنبوبة لكل تردد . كرر الحل بالنسبة لأنبوبة مماثلة ولكنها مفتوحة الطرفين .

37 ـ ما هي أصغر ثلاثة ترددات رنينية لأنبوبة مفتوحة الطرفين طولها 90.5 cm . ارسم شكل الموجة داخل الأنبوبة لكل تردد . كرر الحل بالنسبة لأنبوبة مماثلة أحد طرفيها مغلق .

38 ـ في تجربة كالمبينة بالشكل 14-15 لوحظ حدوث الرنين عندما يكون ارتفاع الماء في الأنبوبة 31.55 cm وحدوثه مرة أخرى عندما يكون ارتفاع الماء فيها 40.65 cm . فإذا لم يحدث أي رنين بين هذين الارتفاعين ، أوجد تردد الشوكة الرنانة .

39 ـ يريد رجل أن يعين عمق سطح الماء في بئر قديم باستعمال ماسورة من الحديد . ونظرًا لحساسية أذن هذا الرجل لدرجة الصوت ، قام الرجل بإجراء تجربة رنين مستعملا الماسورة باعتبارها أنبوبة مغلقة عند أحد الطرفين ومفتوحة عند الطرف الآخر . فإذا كان أقل تردد رنيني يقيسه الرجل 81 Hz . فعلى أي عمق يقع سطح الماء بالنسبة إلى فوهة الماسورة ؟

40 ـ يبلغ طول نفق لنكولن الذي يمر تحت نهر هدسون بمدينة نيويورك حوالى 2630 m . ما هي الترددات الرنينية للنفق ؟ ما

هى الأهمية العملية لذلك فى رأيك ، إن وجدت مثل هذه الأهمية ؟

41 ـ تهتز أنبوبة اهتزازًا رنينيًا عند الترددات المتعاقبة الآتية 415 Hz و 581 Hz و 747 Hz . (أ) ما هو التردد الرنينى الأساسى لهذه الأنبوبة ؟ هل هى مفتوحة الطرفين أم أن أحد طرفيها مغلق ؟

42 ـ سرعة الصوت فى الهيدروجين حوالى 1270 m/s . فإذا ملأت أنبوبة ترددها الرنينى فى الهواء 550 Hz بغاز الهيدروجين ، فماذا سيكون التردد الرنينى الأساسى فى هذه الحالة ؟

43 ـ تصدر أنبوبة أرغن معينة ترددًا أساسيًا قدره 630 Hz عندما تكون درجة حرارتها 18°C ، وتوجد أنبوبة أخرى مماثلة قريبة من سخان عند درجة حرارة قدرها 27°C . ما هو تردد الضربات المسموعة عندما تعزف الأنبوبتان معًا ؟

44 ـ أنبوبتان متماثلتان لكل منهما طرف مغلق وآخر مفتوح وطولهما 67 cm . وضعت إحدى الأنبوبتين فى غرفة تحتوى على الأكسجين النقى ووضعت الأخرى فى غرفة تحتوى على النيتروجين النقى . فإذا استمعت إلى تسجيل لصوتى هاتين الأنبوبتين يصدران منهما بالتردد الأساسى لكل ، فما هو تردد الضربات التى تسمعها ؟

القسم 15-11

45 ـ بأى سرعة يجب أن تتحرك سيارة تجاهك بحيث يبدو تردد نفيرها أعلى بمقدار 5 فى المائة من قيمته عندما تكون السيارة ساكنة ؟ وبأى سرعة يجب أن تتحرك السيارة مبتعدة عنك لكى يكون تردد الصوت الذى تسمعه من نفيرها أقل بمقدار 5 فى المائة من قيمته عند سكون السيارة ؟

46 ـ طائر يطير مبتعدًا عنك بسرعة مقدارها 21.3 m/s وهو يصدح بنغمة نغية ترددها 2040 Hz . ما هو تردد الصوت الذى تسمعه إذا كانت درجة حرارة الهواء 15°C m/s .

47 ـ مصدر صوتى يقع فى مركز الإحداثيات ويرسل موجات ترددها f فى الاتجاه الموجب للمحور x أثناء هبوب الريح بسرعة مقدارها 17.5 m/s فى الاتجاه الموجب للمحور x أيضًا . (أ) أوجد التردد والطول الموجى للموجة الصوتية التى يسمعها مشاهد يقع موضعه على المحور x . اعتبر أن سرعة الصوت فى الهواء الساكن v . (ب) كرر الحل فى حالة هبوب الريح بنفس السرعة فى الاتجاه السالب للمحور x .

48 ـ يقترب مصدر صوتى تردده 440 Hz من حائط بسرعة مقدارها 12.5 m/s ، وتنعكس الموجة الصوتية بعد سقوطها على الحائط إلى الخلف فتصل إلى مشاهد متحرك مع المصدر . ما هو تردد الموجة المنعكسة كما يسمعها المشاهد ؟

49 ـ تغيرت درجة صوت صفارة الإنذار بسيارة إسعاف من 850 Hz إلى 770 Hz لحظة عبورها لك وأنت واقف على إفريز الشارع ، وكانت درجة حرارة الهواء عندئذ 10°C . بأى سرعة كانت تتحرك سيارة الإسعاف ؟

50 ـ يتحرك قطاران فى اتجاهين متضادين على خطى سكة حديد متوازيين بحيث كان كلاهما يقترب من إحدى المحطات . فإذا علمت أن تردد الصوت المنبعث من نفيرى القطارين 550 Hz ، وأن سرعة اقتراب أحد القطارين من المحطة 32 m/s ، فما هى سرعة القطار الآخر إذا كان تردد الضربات التى يسمعها مشاهد مساكن على المحطة 4.4 Hz ؟

القسم 15-12

51 ـ تطير طائرة أفقيًا فوق منطقة صحراوية مسطحة بسرعة قدرها Mach 1.8 . سمع دوى اختراق حاجز الصوت فى نقطة معينة على الأرض بعد مرور زمن قدره 8.1 s اعتبارًا من لحظة عبور الطائرة فوق هذه النقطة مباشرة . افترض أن سرعة الصوت فى الهواء 350 m/s . على أى ارتفاع تطير الطائرة ؟

52 ـ تطير طائرة بسرعة فوق صوتية على ارتفاع معين سرعة الصوت عنده 320 m/s ، وقد لوحظ أن الموجة الصدمية تصنع زاوية قدرها 33.5° مع اتجاه الطائرة . ما هى سرعة الطائرة والعدد الماخى لها ؟

■ 53 ـ تتغير درجة الحرارة فى الغلاف الجوى للأرض مع الارتفاع ، وبالتالى تتغير سرعة الصوت معه أيضا . وتكون درجة حرارة 218 K تقريبًا على ارتفاع 20 km ، بينما تكون 218 K على ارتفاع 1 km . لنفرض أن سفينة فضائية قد اقتحمت الغلاف الجوى من الفضاء الخارجي حيث كانت سرعتها 8700 m/s وهى على ارتفاع 20 km وأن سرعتها قد انخفضت إلى 4800 m/s لحظة وصولها إلى ارتفاع قدره 1 km . احسب العدد الماخى وزاوية الموجة الصدمية التى تسببها السفينة الفضائية على هذين الارتفاعين .

مسائل عامة

■■ 54 ـ سلك طوله 4.0 m وكثافته الطولية 2.2 g/m مثبت من طرفيه فى قائمين بحيث كان الشد فيه 340 N . ويعطى هذا السلك تحت هذه الظروف نمطًا موجيًا مستقرًا يتكون من خمس عروات بين طرفيه . ويوجد بالقرب من هذا السلك أنبوبة رفيعة ذات كباس قابل للحركة يغلق أحد طرفيها . وبتحريك الكباس وجد أن الصوت الصادر من الوتر يسبب حدوث الرنين فى الأنبوبة عندما يكون الكباس على بعد قدره 1.07 m من الطرف المفتوح للأنبوبة . بأى توافقية ترن الأنبوبة وما قيمة تردد الصوت ؟ افترض أن درجة حرارة الهواء فى الغرفة 30°C .

■ 55 ـ ضبطت أنبوبة أرغن فى بداية حفل موسيقى بحيث كان تردد توافقيتها الثالثة 1320 Hz . وقد كانت درجة الحرارة الابتدائية فى قاعة الحفل 23°C ، ولكنها ارتفعت بمرور الزمن . وأثناء الاستراحة قام العازف بمقارنة تردد نفس توافقية أنبوبة الأرغن بنغمة قياسية ترددها 1320 Hz فسمع ضربات عددها 5 فى الثانية الواحدة . ما هى درجة حرارة القاعة أثناء فترة الاستراحة ؟ (افترض أن طول الأنبوبة لم يتغير) .

■ 56 ـ النقطتان A و B فى الشكل م 4–15 يمثلان مصدرين ساكنين لموجات صوتية متساوية التردد f . وبينما كانت مشاهدة تقود فى سيارتها مقتربة من A ومبتعدة عن B بسرعة قدرها 100 km/h لاحظت المشاهدة أن تردد الضربات الناتجة عن تداخل صوتى المصدرين يساوى 20 Hz . احسب تردد الصوت المنبعث من المصدرين بفرض أن درجة حرارة الهواء 23°C .



شكل م 4–15

■ 57 ـ أراد شخص تعيين عمق بئر فألقى حجرًا فيه فسمع صوت ارتطامه بسطح الماء بعد زمن قدره 3.34 s من لحظة تحريره . ما عمق هذا البئر ؟ (إهمل مقاومة الهواء للحجر أثناء السقوط) .

■ 58 ـ إذا كان دخل قدرة مكبر استريو 0.50 mW وخرج قدرته بعد التكبير 90 W ، فما قيمة معامل كسب المكبر مقاسًا بالديسيبل ؟

■■ 59 ـ أنبوبة رفيعة جدًا ذات طرف مغلق وآخر مفتوح طولها 45 cm . وضع مصدر صوتى مهتز تردده 205 Hz فوق الطرف المفتوح مباشرة ثم عُجل مبتعدًا على الأنبوبة على استقامة محورها . عند أى سرعة للمصدر الصوتى يحدث أول اهتزاز رنينى للأنبوبة ؟ ما هى التوافقية المناظرة لهذا الرنين ؟ اعتبر أن درجة حرارة الهواء 0°C .

■■ 60 ـ قضيب من الألمنيوم طوله 10.6 m . عندما وضعت آلية مهتزة على استقامة محور القضيب تولدت فيه موجات صوتية طولية تتحرك بطول القضيب وتنعكس عند طرفيه . ما هو تردد المهتز عند حدوث الرنين الأساسى فى القضيب ؟

الجزء الثالث

الكهربية والمغناطيسية

إن المشكلة لا تحل فى المعمل إنها تحل داخل عقل شخص ما، وكل ما على الأجهزة عمله هو أن تدير رؤوسها حتى ترى الأشياء على النحو الصحيح

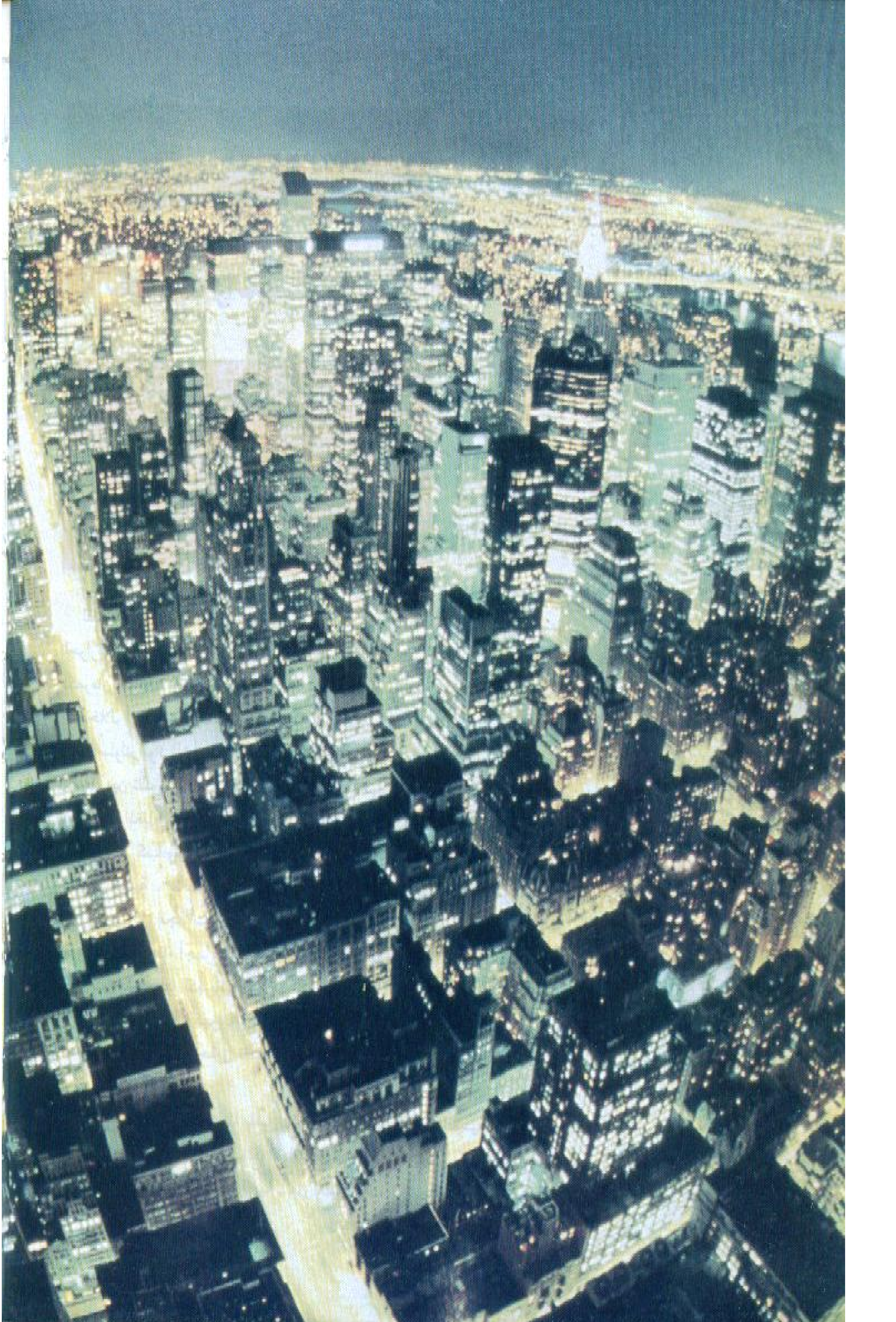
تشارلز كترنج

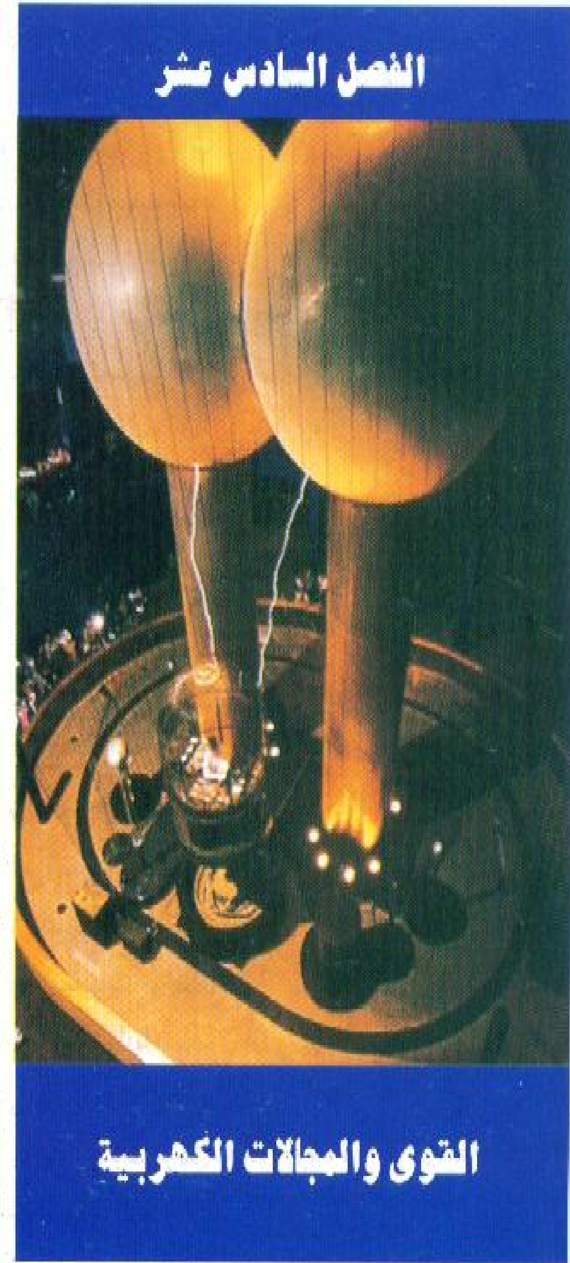
لقد تطلب وصفنا للظواهر الفيزيائية حتى الآن أربع كميات مستقلة وأساسية فحسب ـ وهى الكتلة ، والطول ، والزمن ودرجة الحرارة . إلا أن رصد قوى أخرى فى الطبيعة ـ مثل المغناطيسية الطبيعية لحجر المغناطيس وجذب فتات المادة بواسطة معدن الكهرمان (واسمه باليونانية إلكترون) الذى سبق دلكه بقطعة من القماش ـ قد تم تسجيلها منذ أزمنة بعيدة .

وخلال أواخر القرن الثامن عشر وبداية القرن التاسع عشر بدأ باحثون مثل كولوم فى فرنسا وفرانكلين فى الولايات المتحدة دراسة سلوك المواد المشحونة كهربيًا ، مكتشفين أن هناك نوعين متضادين من الشحنات ، ومشتقين قانون القوة التى تحكم التفاعل بين تلك الشحنات . وقد أخذ النجاح يتلو النجاح خلال القرن التاسع عشر حين دأب العلماء على تنمية فهم مجال الكهربية والمغناطيسية . وكان انحراف إبرة البوصلة حين توضع بالقرب من تيار كهربى دليلاً على أن التيار ينشئ مجالاً مغناطيسيًا . كما وجد أن المجالات المغناطيسية المتغيرة تنشئ مجالات كهربية . وقد تم التنبؤ نظريًا بوجود موجات كهرومغناطيسية ، تتألف من مجالات مغناطيسية وكهربية مهتزة وتنتقل بسرعة الضوء ، ثم تلا ذلك عرضها معمليًا .

ومن بين كل إنجازات الفيزياء الكلاسيكية قد لا يوجد ما ينافس ما ذكرناه الآن من حيث آثاره البعيدة ، حيث أصبح فى مقدورنا تصميم وبناء أجهزة حولت حياتنا اليومية بشكل حقيقى ، وقد يشمل تصنيف تلك الأجهزة والأدوات الضوء الكهربى والمولدات والمحركات الكهربائية وكل وسائل الاتصالات الإلكترونية مثل التليفون والراديو والتليفزيون . كما أن أجهزة أخرى تعتمد فى بنائها على الكهربية والمغناطيسية قد جعلت من المكن قياس ظواهر أدق وأسرع بحيث اتسعت آفاق وحدود البحوث الأساسية . بل أمكن تحقيق تقدم هائل فى التشخيص والعلاج الطبيين ، وكذلك فى استنباط وسائل جديدة لإنتاج المواد وتصنيع السلع المختلفة .

إن الفوائد التى عادت علينا بفضل البحوث فى الكهربية والمغناطيسية لم تكن فى مخيلة أولئك العاملين فى تلك البحوث ، بل ولم تكن هذه الفوائد هى الدافع الأول لديهم لإنجاز أبحاثهم . ولعلنا نحسن صنعًا حين ننظر فى هذه الأمثلة عندما يتساءل صانعو القرارات بناء على نتائج قريبة ـ عن أهمية الاستمرار فى البحث سعيًا وراء المعرفة الأساسية .





لاشك أنه من العسير علينا تصور العالم منذ قرن من الزمن عندما كان استخدام الكهرباء لا يزال فى مهده . ولم يكن الضوء الكهربائى متاحًا إلا لعدد قليل من الناس أما الآلات والأجهزة الكهربائية التى اعتدنا الآن عليها فلم تكن موجودة بالمرة . وكانت المحركات البدائية والبطاريات مجرد فضول فى بداياته لبيان الأهمية العملية لها . وتبدو المفارقة هائلة اليوم حيث تدخل الكهرباء بشكل أو بآخر فى عمل كل ما نستخدمه من آلات . وبسبب هذا الانتشار الواسع للكهرباء كأداة مهمة ، وجب أن يستوعبها كل المتعلمين . وسوف ننفق عددًا من الفصول القادمة فى تعلم الطرق التى تلعب بها الكهرباء دورًا مؤثرًا فى العالم من حولنا .

16-1 مفهوم الشحنة الكهربية

من الحقائق التاريخية أنه فى القرن السادس قبل الميلاد ، عرف طاليس اليونانى أن الشرارة يمكن أن تحدث وأن الأشياء الخفيفة تنجذب إلى الكهرمان الذى سبق دلكه بالفراء . وكلمة الكهرمان باليونانية هى « إلكترون » ومنها اشتق اسم الكهربية . وخلال القرن الثامن عشر أجرى قدر هائل من التجارب « لكهربة » الأشياء ، بما فى ذلك كهربة البشر وما صاحب ذلك من نتائج فكاهية .

ومن أكبر العلماء أثرًا وإنتاجًا الأمريكى بنيامين فرانكلين ، الذى تعتبر تجربته لإيضاح التكافؤ بين الكهرباء والبرق بواسطة طائرة ورقية تحلق داخل سحابة رعدية ـ تجربة

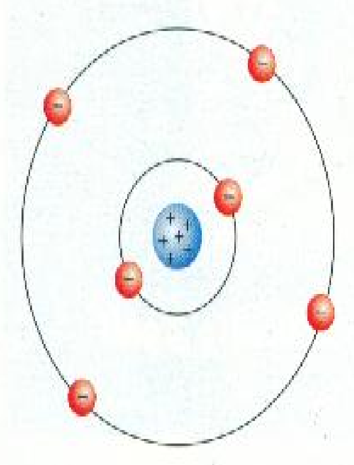
أسطورية . كما كان فرانكلين أول من اقترح مصطلح « الموجب » « والسالب » على نوعى التكهرب اللذين يمكن للجسم أن يصاب بهما .

وقد شهد القرنان التاليان تطور نظرية شاملة للظواهر الكهربية والمغناطيسية . وقرب نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين تم إنجاز الاكتشافات الأساسية للتركيب الكهربائى للذرة . وفى عام 1871 قاس العالم الإنجليزى ج . ج . طومسون خواص الشحنة السالبة الأساسية وهى الإلكترون ، كما نجح العالم أرنست رذرفورد وهو إنجليزى أيضًا فى عام 1911 فى تحديد هوية النواة الموجبة المتناهية فى الصغر والتى يدور حولها الإلكترون ليكونا معًا الذرة . وأخيرًا ، وفى إطار سلسلة من التجارب التى أجريت فيما بين 1909 و 1917 تمكن العالم الأمريكى وليام ميليكان ومساعدوه من قياس كمية شحنة الإلكترون بدقة .

دعنا الآن نبدأ فى مناقشة طبيعة الشحنة الكهربية حتى ننتقل بعدها إلى استكشاف التنوع الهائل فى الظواهر الكهربية .

16-2 الذرات كمصدر للشحنة

لقد أوضحت الاكتشافات التى ذكرت فى القسم السابق أن الذرة تتكون من نواة ضئيلة موجبة الشحنة يدور حولها جسيمات سالبة الشحنة يطلق عليها إلكترونات . ويتضح هذا بالنسبة لذرة الكربون فى الشكل 1-16 . ولعلك تذكر من مقررات الكيمياء أن الذرات متعادلة كهربيًا ؛ بمعنى أن كمية الشحنة الموجبة بالنواة مساوية تمامًا للشحنة السالبة الكلية التى تحملها الإلكترونات حول النواة . وفى حالة ذرة الكربون ، إذا كانت $-e$ هى شحنة الإلكترون الواحد فإن شحنة النواة هى $+6e$ بالضبط . وسوف نؤجل المناقشة التفصيلية للذرة إلى فصل قادم وسنكتفى هنا باستخدام التركيب الكهربائى لها .



شكل 1-16:
تمثيل تخطيطى لذرة كربون . تتوازن الشحنات السالبة على إلكترونات الذرة الست تمامًا بالشحنة الموجبة للنواة . (النواة والإلكترونات أصغر بكثير جدًا عما هو مبين بالشكل) .

وعلى ما يبدو فالكون كله تقريبًا - إن لم يكن تمامًا - متعادل كهربيًا ، والكرة الأرضية نفسها ليس عليها سوى القدر اليسير - إن وجد أصلاً - من فائض الشحنات الموجبة أو السالبة ؛ ولذا يمكننا فى جميع الأغراض العملية ، اعتبار أن الأرض ليس عليها شحنات فائضة . أما الغالبية العظمى من الشحنات على الأرض وبداخلها فمحتواة داخل الذرات . وإذا وجدت شحنات حرة سواء كانت موجبة أم سالبة فإنها عادة ما تعتبر منتزعة من ذرات ما .

وليس من الصعب على الإطلاق انتزاع إلكترون من الذرة - تحت ظروف معينة - وعلى سبيل المثال ، فلو أن قضيبًا من الإبونيت (وهو نوع من المطاط الصلب) قد دلك فى قطعة من الفراء الحيوانى فإن بعض إلكترونات ذرات الفراء تلتصق بقضيب الإبونيت عن طريق الاحتكاك . (وليس من السهل شرح السبب وراء انتقال الشحنة هذا . وإن كان هذا الموضوع يرد فى المقررات التى تتناول فيزياء الجوامد) . وهكذا فإن القضيب يكتسب **فائضًا خالصًا من الإلكترونات** التى تجعله مشحونًا بشحنة

سالبة . وعندما يلامس جسمًا معدنيًا فإن بعضًا من فائض الإلكترونات ينتقل إلى المعدن كما يوضح الشكل 2-16 .

قضيب من الأبونيت

كرة معدنية

(أ) قبل

(ب) أثناء

(جـ) بعد

شكل 2-16:
عندما يلامس قضيب الإبونيت المشحون بشحنة سالبة الكرة المعدنية غير المشحونة فإن الإلكترونات تنفصل عن القضيب لتنتشر فوق الكرة .

وبالمثل فلو أن قضيبًا زجاجيًا دلك فى قطعة من الحرير فإن بعضًا من الإلكترونات يغادر ذرات القضيب ، مخلفة **فائضًا من الشحنات الموجبة عليه** . وإذا لامس القضيب موجب الشحنة كرة معدنية متعادلة ، فإن الإلكترونات تغادر بعض ذرات المعدن لتحل محل تلك الإلكترونات التي فقدتها ذرات الزجاج ونتيجة لهذا تكتسب الكرة المعدنية شحنة موجبة خالصة .

ويؤدى احتكاك كثير من المواد بعضها بالبعض الآخر إلى فصل الشحنات . والمواد التي وصفناها الآن تم استخدامها قديمًا لتعريف الشحنة السالبة والشحنة الموجبة قبل أن يعرف الناس بوجود الإلكترون .

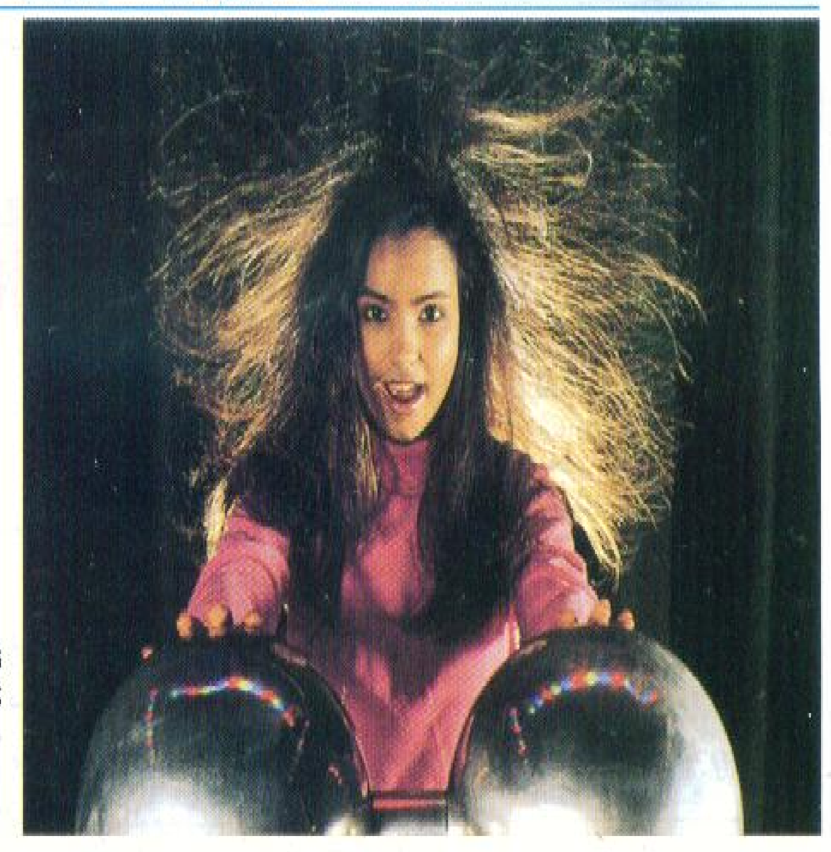
16-3 القوى الكائنة بين الشحنات

الآن وقد عرفنا كيفية الحصول على أجسام مشحونة بشحنات موجبة وسالبة ، فإننا فى وضع يسمح بفحص القوى الكائنة بين كرات خفيفة للغاية ومغطاة بطبقة معدنية . ويمكن شحن تلك الكرات بجعلها تلامس قضيبًا مشحونًا من الزجاج أو الإبونيت . وإذا علقت الكرات من خيوط خفيفة لأمكن إجراء أربع تجارب شيقة ، يوضحها الشكل 3-16 ويمكننا أن نستنتج منها ما يلى :

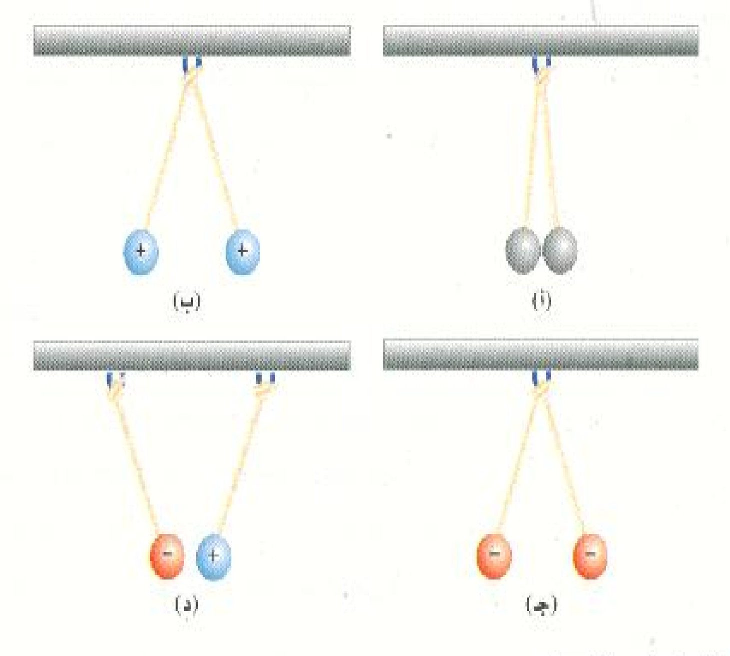
1 تتنافر الشحنات المتشابهة مع بعضها البعض ، بمعنى أن شحنتين موجبتين تتنافران من بعضهما البعض وكذلك تفعل شحنتان سالبتان .

2 تتجاذب الشحنات المختلفة نحو بعضها البعض ، بمعنى أن الشحنات الموجبة تجذب الشحنات السالبة والعكس بالعكس .

3 دائمًا ما يزيد مقدار القوة الكهربية الكائنة بين جسمين مشحونين عن قوة الجاذبية بينهما . (وعلى سبيل المثال فقوة الجاذبية بين الكرتين فى الشكل ب ، جـ ، د أقل بكثير جدًا بحيث لا تؤثر فى الطريقة التى تتعلق بها) .



تتلقى خصلات شعر هـذه الطالبـة شحنـات كهربية لها نفس الإشارة من مولد للكهربيـة الساكنة . . وتتنافر هذه الشحنات مع بعضها البعض مما يجعل شعر الطالبة يتطاير بشكـل غريب .



شكل 3-16:
الكرتان فى (أ) غير مشحونتيـن . أمـا الكرات المشحونة فى كل من (ب) ، (جـ) ، (د) فتوضـح أن الشحنـات المتشابهـة تتنافر مع بعضها البعض بينمـا تتجـاذب الشحنات المختلفة إلى بعضها البعض .

16-4 العوازل والموصلات

على الرغم من كـون المواد كلـها مكونة من ذرات . . والذرات كلـها مكونة مـن إلكترونات ونـوى إلا أننا نعلم جميعًا التفاوت الكبير فى الخواص الكهربية للمواد . وهناك مجموعتان رئيسيتان تنقسم إليهما المواد تبعًا لخواصها الكهربية وهما : **الموصلات وغير الموصلات** (أو العوازل) * .

* هناك قسم ثالث للمواد يطلق عليه **أشباه الموصلات** وقد يعمل كعازل أو كموصل حسب درجة حرارته وظروف الطاقة الأخرى المؤثرة عليه .

ففى العوازل ، تكون إلكترونات أية ذرة مربوطة بشدة إلى تلك الذرة وغير حرة على الحركة خلال المادة ؛ ولهذا ، فحتى لو أن قضيبًا مشحونًا اقترب من عازل ما ، فإن إلكترونات ونوى ذرات ذلك العازل لن تكون قادرة على الحركة تحت تأثير التجاذب أو التنافر مع شحنة القضيب .

أما الموصلات الكهربية فلها مسلك مختلف تمامًا ؛ إذ تحتوى على شحنات حرة الحركة خلال المادة . والفلزات موصلات مألوفة ؛ وعلى الرغم من أن كل ذرة فى الفلز متعادلة بطبعها (أى غير مشحونة إلا أن الإلكترونات البعيدة عن النواة معرضة للتحرر بسهولة عن الذرة . ثم هى بعد ذلك قادرة على الحركة خلال الفلز حاملة شحناتها السالبة من موقع إلى آخر فى عملية الانتقال . ولهذا ، فحين يقترب قضيب سالب الشحنة من قطعة فلزية (دون أن يلمسها) ، فإن القضيب يتنافر مع بعض الإلكترونات الحرة داخل الفلز فتندفع إلى أقصى بقعة من الفلز . وبنفس الطريقة يجذب قضيب موجب الشحنة الإلكترونات الحرة إلى أدنى بقعة فى الفلز من القضيب .

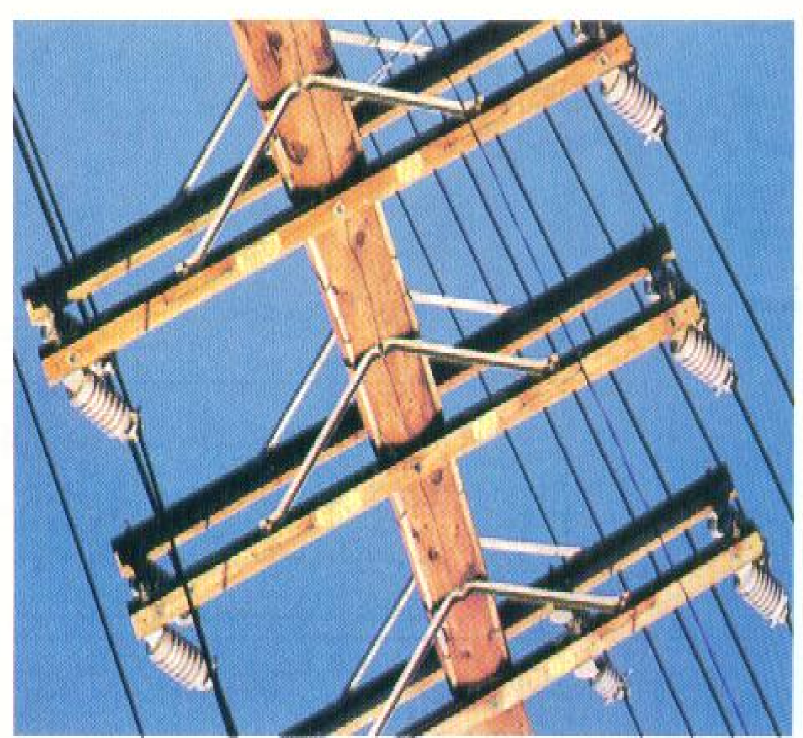
وليست الفلزات هى الموصلات الكهربائية الوحيدة ، فكثير من المواد - مثل المحاليل الأيونية - تحتوى على أيونات (ذرات مشحونة) قادرة على الحركة بحرية نسبية خلال المادة . وكل الموصلات الكهربائية تحتوى على شحنات قادرة على الحركة لمسافات كبيرة عندما تتنافر أو تتجاذب مع أجسام مشحونة قريبة .



شكل 4-16:
أحد نماذج إلكتروسكوب ذى ورقة ذهبية ، ويتم عزل الجزء المكون من الكرة الفلزية (المعدنية) والقضيب والورقة الذهبية عن جسم الإلكتروسكوب .

16-5 الإلكتروسكوب (المكشاف الكهربى)

الإلكتروسكوب (الشكل 4-16) هو أداة بسيطة تستخدم للكشف عن وقياس شحنات ضئيلة المقدار . وهو مكون من قضيب (ساق) فلزى معلق به وريقتان رقيقتان

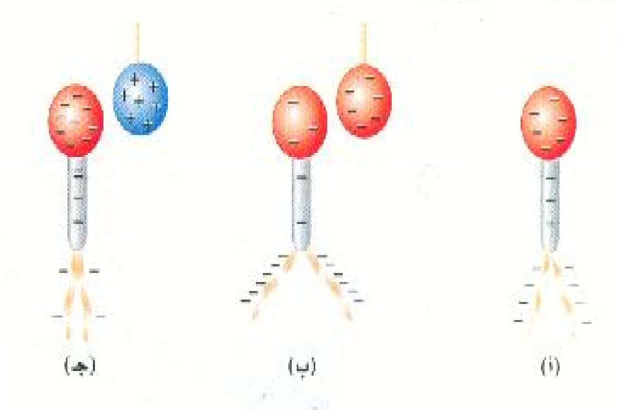


يستدعى نقل الكهرباء استخدام موصلات لحملها وعوازل لحماية الأعمدة التى ترفع عليها أسلاك التوصيل (الكابلات) .

للغاية ومصنوعتان من رقائق الذهب ، داخل علبة معدنية وذلك من خلال عازل يحفظ القضيب من ملامسة العلبة . ويغطى وجها العلبة بالزجاج حتى يمكن رؤية وضع الوريقات الذهبية .

سنفترض الآن أن شحنة سالبة قد نقلت إلى الإلكتروسكوب وذلك عند ملامسة قطعة إبونيت مشحونة للكرة المعدنية ..... وستكون هذه الشحنة محصورة فى نطاق الكرة والقضيب والوريقات الذهبية نظرًا لكونها جميعا معزولة . ولما كانت الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض ، فإن الشحنات السالبة التى على القضيب ـ فى الأصل ـ توزع نفسها بشكل منتظم على الكرة والقضيب والوريقات الذهبية . وينشأ عن هذا أن الوريقتين ـ لكونهما حرتى الحركة ولتنافرهما مع بعضهما البعض بالشحنات المتشابهة عليهما ـ تتخذان الوضع الموضح فى الشكل 5-16 (أ) .

وإذا ما قربت كرة سالبة الشحنة من الكرة المعدنية للإلكتروسكوب ، كما فى الشكل 5-16 (ب) فإن كثيرًا من الشحنات السالبة داخل الكرة المعدنية تتدافع إلى أسفل القضيب مسببة مزيدًا من الانفراج بين الوريقتين . ويحدث العكس تمامًا إذا قربت كرة موجبة الشحنة من الإلكتروسكوب (الشكل 5-16 (جـ)) وعلاوة على ذلك فالكرة التى لا شحنة عليها لن تثير أى اضطراب ملحوظ فى الإلكتروسكوب . ويمكننا باستخدام هذا الجهاز تحديد إشارة الشحنة الكهربية وكذا مقدارها بالتقريب . وعليك الآن أن تقنع نفسك أن إجراء مشابهًا يمكن تتبعه لو أن الإلكتروسكوب قد شحن فى البداية بشحنة موجبة .



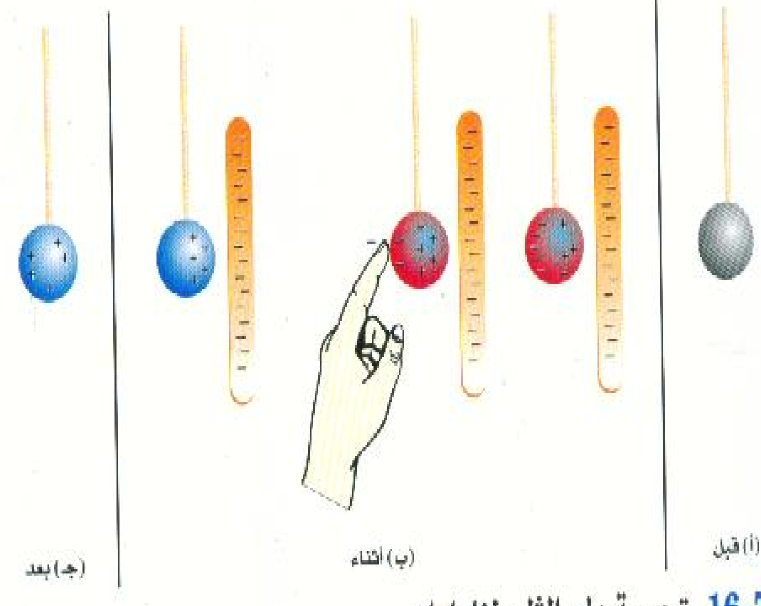
شكل 5-16:
يستخدم الإلكتروسكوب المشحون فى تحديد الإشارة والمقدار التقريبى للشحنة التى على جسم ما .

6-16 الشحن بالتوصيل وبالحث

هناك طريقتان عامتان لوضع شحنات كهربية على جسم معدنى باستخدام جسم ثان مشحون سلفًا . ولنعتبر مثلا الطرق التى تستطيع بها استخدام قضيب من الإبونيت سالب الشحنة فى شحن كرة معدنية . . واحدى الطرق هى بأن نجعل الكرة تلامس القضيب كما ذكر فى القسم السابق . وعندما يحدث الاتصال تتحرك بعض الشحنات السالبة الفائضة من القضيب نحو الكرة . وهذه العملية التى يوضحها الشكل 2-16 تسمى **الشحن بالتوصيل** .

كما يمكن استخدام نفس القضيب بطريقة أخرى لشحن الكرة . وهذا ما يوضحه الشكل 6-16 . وخلال هذه العملية التى يطلق عليها الشحن بالحث (أو بالتأثير) لا يتم تلامس بين القضيب والكرة على الإطلاق . إذ عندما يقرب القضيب من الجانب الأيسر للكرة فإن بعض إلكترونات المعدن تندفع نحو الجانب الأيمن للكرة مخلفة شحنة موجبة على الجانب الأيسر . وحيث أنه لم تحدث إضافة أو إزالة أية شحنات من على الكرة فإنها تظل - بطبيعة الحال - متعادلة كهربيًا . افترض الآن أنك قمت بلمس الكرة بجسم ما غير قضيب الإبونيت المشحون ، كأصبعك مثلاً . ولما كان جسمك يعتبر موصلاً للكهرباء (بالرغم من أنه ليس موصلاً جيدًا) فإن الشحنات تتحرك من على الكرة عبر جسدك متجهة إلى الأرض . وهكذا فالقضيب سالب الشحنة الموجود بالقرب من الكرة يستحث شحنات سالبة كى تغادر الكرة وتنتقل إلى الأرض . (ويقال حينئذ أن الكرة **موصلة بالأرض (مؤرّضة)** ، ويستخدم الرمز ⏚ لإيضاح ذلك . ولتوصيل جسم ما بالأرض لابد من توصيله بواسطة سلك معدنى بإحدى أنابيب المياه أو بجسم آخر جيد التوصيل مغروس فى الأرض) . وبمجرد أن تنتقل الشحنات السالبة من الكرة إلى الأرض ، فإن الكرة لن تصبح متعادلة . وإذا ما فصل الخط الموصل بالأرض ، وأبعد القضيب سالب الشحنة ، فإن الكرة ستصبح موجبة الشحنة . (لماذا يتم إبعاد جسم التوصيل بالأرض قبل إبعاد القضيب المشحون ؟) .

لو أنك قارنت بين الشكلين 2-16 و 6-16 لأمكنك ملاحظة أن قضيب الإبونيت يمكنه شحن جسم معدنى بشحنة **سالبة** عن طريق **الحث** (أو التأثير) . وقد يكون من الشيق لك أن تقوم برسم أشكال مماثلة باستخدام قضيب زجاجى موجب الشحنة . وفى هذه الحالة تكون الشحنات معكوسة الإشارة .



شكل 6-16:
شحن كرة معدنية بالحث لاحظ أن القضيب والكرة لا يتلامسان مطلقًا ، ولكن الإصبع والكرة يتلامسان ونتيجة لهذه العملية ينتهى الأمر بالقضيب والكرة وعلى كل منهما شحنة مختلفة .

7-16 تجربة دلو الثلج لفاراداى

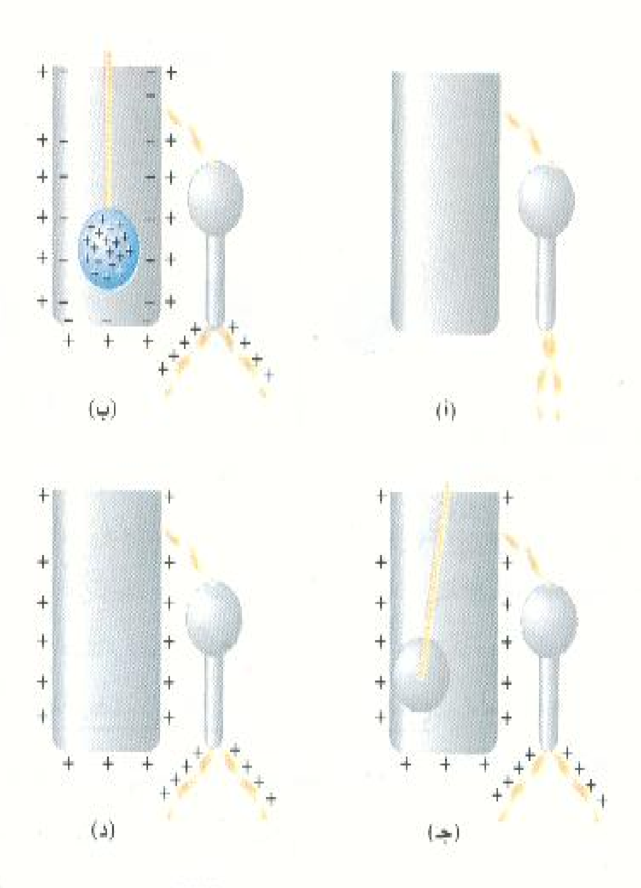
فى عام 1843 قام مايكل فاراداى بإجراء تجربة بسيطة وإن كانت مفيدة للغاية ، حيث أوصل دلو ثلج معدنى بالإلكتروسكوب غير مشحون كما يوضح الشكل 7-16 (أ) .

وعندما أدلى كرة معدنية موجبة الشحنة ومعلقة بخيط داخل ذلك الدلو (دون أن تلامسه) ، كما في الشكل (ب) فإن ورقتي الإلكتروسكوب انفرجتا مما يدل على أن بعض الشحنات قد انتقلت بالحث على السطح الخارجي للدلو .

وعلاوة على ذلك ، فعندما تحركت الشحنات في نطاق الدلو فإن إنفراج ورقتي الإلكتروسكوب لم يتغير . ولم ترجع الوريقتان إلى وضعهما المتلاصق إلا عندما انتزعت الكرة من داخل الدلو مما يدل على أن الدلو قد عاد إلى حالة التعادل الكهربي .

وقد لاحظ فاراداى أيضًا ، أنه عند تلامس الكرة المعدنية المشحونة بالجدار الداخلي للدلو ، كما في الشكل (جـ) ، فإن ورقتي الإلكتروسكوب ظلتا في وضع الانفراج والتباعد . على أنه في هذه الحالة ـ لو نزعت الكرة من داخل الدلو فإن ورقتي الإلكتروسكوب بقيتا منفرجتين كما في الشكل (د) ، مما يدل على أن الدلو ظل مشحونًا وعندما قربت الكرة من إلكتروسكوب آخر ، فإنها لم تحدث أي تأثير على الوريقات الذهبية . وعلى ما يبدو فإن ملامسة الكرة للجدار الداخلي للدلو قد عادلت تمامًا الشحنة الأصلية الفائضة على سطح الكرة . وحيث أن ورقتي الإلكتروسكوب المتصل بالجدار الخارجي للدلو لم تتحركا عندما لامست الكرة الجدار الداخلي له فإن فاراداى استنتج أن السطح الداخلي للدلو قد كان عليه ما يكفي من الشحنة ليعادل الكرة **تمامًا** ، وأن الدلو قد تُرك الآن وعلى سطحه الخارجي شحنة صافية مساوية للشحنة التي كانت في الأصل على الكرة .

ويمكننا بناء على هذه التجارب أن نخرج بالنتائج التالية :



شكل 7-16:
تجربة دلو الثلج لفاراداى .

1 إذا علق جسم معدنى مشحون داخل وعاء معدنى متعادل فإنه يستحث شحنة مساوية في المقدار ومخالفة فى الإشارة على الجدار الداخلى للوعاء .

2 عندما يلامس الجسم المعدنى المشحون الجدار الداخلى للوعاء فإن الشحنة الناشئة بالحث تعادل تمامًا الشحنة الفائضة على الجسم .

3 عندما يوضع جسم مشحون داخل وعاء معدنى متعادل ، فإن شحنة مساوية ولها نفس الإشارة تدفع إلى السطح الخارجى للوعاء .

4 تستقر كل الشحنة الصافية على أى جسم معدنى على سطحه الخارجى عندما يتوافر مسار موصل يمكن للشحنة أن تمر فيه .

هذه حقائق مهمة تتعلق بالشحنات الكهربية الموجودة على الموصلات وسوف نقوم بتفسيرها بشكل أشمل عند فحص قانون كولوم ومفهوم المجالات الكهربية فى الأقسام 16-9 حتى 16-13 .

16-8 بقاء الشحنة

تعلمنا فى الميكانيكا أن الطبيعة تحافظ (تبقى على) كميات معينة . ومن بين تلك الكميات ، الطاقة ، كمية الحركة الخطية وكمية الحركة الزاوية . وتخضع كل من هذه الكميات لقانون بقاء ، وكما رأينا من قبل فإن هذه الحقيقة ذات أهمية عظيمة فى الكون الذى نعيش فيه .

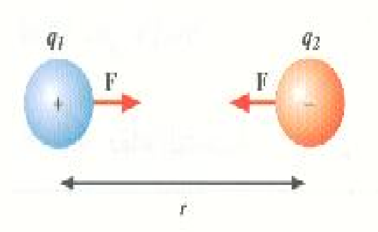
هناك أيضًا قوانين للبقاء تنطبق على الكميات الكهربية . وأحد هذه القوانين هو قانون بقاء الشحنة الكهربية ؛ ومضمونه أن المجموع الجبرى لكل الشحنات فى الكون يبقى ثابتًا على الدوام . وقد أصبحت هذه الحقيقة واضحة لنا فى هذا القرن فقط . فعندما تمكن العلماء من توليد جسيمات جديدة عند قذف جسيم ذى طاقة عالية بجسيم آخر داخل معجلات عملاقة ، فإنهم اكتشفوا أن الشحنات دائمًا ما تولد (أو تتلاشى) على هيئة أزواج . وأى تفاعل من شأنه إيجاد إلكترون (شحنته $-e$) يوجد أيضًا جسيمًا شحنته $+e$. وبالمثل عندما يتحد جسيم شحنته $+e$ كالبوزيترون (الإلكترون الموجب) مع جسيم شحنته $-e$ ، فإن الشحنتين كلتيهما تختفيان ، ويكون المجموع الجبرى فى البداية صفرًا ، ويظل صفرًا بعد أن يكتمل التفاعل . وفى كل تجربة ، يكون المجموع الجبرى للشحنات قبل التفاعل هو نفس المجموع بعد ذلك . ويبدو أنه لا توجد وسيلة يمكن بها خلق أو تدمير شحنة صافية . . ونستنتج من هذا أن الشحنة فى الكون لا تتغير . وهذا هو ما يسمى **قانون بقاء الشحنة** . وإحدى وسائل التعبير عن هذا القانون على نطاق أصغر نوعًا ما هى :

لا يمكن خلق أو تدمير شحنة موجبة أو سالبة صافية فى أى عملية فيزيائية .

لاحظ أن القانون لم ينص على أن عدد الإلكترونات أو البروتونات فى الكون ثابت على الدوام ؛ فنحن نعلم عديدًا من التفاعلات يتم فيها إيجاد أو تدمير أزواج من

الجسيمات ذوات الشحنات المتضادة . وعلى الرغم من عدم معرفتنا ـ حتى الآن ـ بالشحنة الصافية الكلية فى الكون ، أو فى مجرتنا ، أو حتى فى الكرة الأرضية والجو المحيط بها (من الممكن أن تكون الشحنة الصافية الكلية قريبة من الصفر) ، إلا أن معرفتنا ببقاء الشحنة ستظل ذات نفع عظيم لنا . وسوف نستعمل هذا المفهوم عند مناقشة الدوائر الكهربائية . وبالإضافة إلى ذلك ، فعندما يحاول علماء فيزياء الجسيمات أن يدركوا كنه الجسيمات التى قد تنشأ فى تفاعلات الطاقات العالية فإن قانون البقاء يرشدهم إلى تقرير أى التفاعلات ممكن وأيها غير ذلك .

16-9 قانون كولوم



شكل 16-8:
تجذب الشحنتان المختلفتان إحداهما الأخرى بقوة متساوية حتى وإن كانت شحنتاهما غير متساويتين فى المقدار .

لقد اكتشف العالم تشارلز أوجستين دى كولوم (1736 – 1806) القانونَ الرياضى الذى يصف كيفية تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب الشحنات المختلفة عام 1785 ، وسمى ذلك القانون **بقانون كولوم** . وبواسطة ميزان حساس للغاية ، شبيه بذلك الذى استخدمه العالم كافندش فى دراساته حول الجاذبية ، استطاع كولوم أن يقيس القوة بين جسمين مشحونين صغيرين (الشكل 16-8) . ولنعتبر كرتين من الصغر بمكان بحيث يمكن اعتبارهما نقطتين بالمقارنة مع المسافة r بين مركزيهما وأنهما تحملان شحنتين $+q_1$ و $-q_2$. وبإجراء عدد من التجارب تمكن كولوم من استنتاج أن القوة المؤثرة على الكرة رقم 1 تتغير فى تناسب طردى مع حاصل ضرب الشحنتين وعكسى مع مربع المسافة بين مركزيهما :

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = \text{constant}\ \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (16\text{–}1)$$

وأن القوة تتخذ الاتجاه المبين فى الشكل 16-8 . ولو أن الشحنتين كانتا إما موجبتين أو سالبتين فإن مقدار القوة سيكون هو نفسه ، أما الاتجاه سيكون عكس ما هو موضح فى الشكل 16-8 وطبقاً لقانون نيوتن للفعل ورد الفعل فإن القوة المؤثرة على الكرة رقم 2 لابد وأن تكون مطابقة فى المقدار ومعاكسة فى الاتجاه .

وقبل أن نتمكن من تقدير قيمة ثابت التناسب فى المعادلة 16-1 فلابد أن نستقر على وحدة لقياس كمية الشحنة . وحيث أن الشحنة والقوة الكهربية التى تحدثها من الخواص الفيزيائية الأساسية الجديدة علينا ، لذا فوحدة الشحنة لا يمكن أن تشتق ببساطة من وحدات معروفة ومستقرة ومثلها مثل الكتلة والطول والزمن ودرجة الحرارة فإن الشحنة ذات بعد أساسى لابد من تعريف وحدته . وكما سنرى فى القسم 22-8 فإن وحدة SI (النظام الدولى) للشحنة تعرف بدلالة التيار الكهربى . أما الآن فسننص ببساطة على أن وحدة SI للشحنة هى **الكولوم** (C) . وحين نستعمل هذه الوحدة لكل من q_1 و q_2 فإن قانون كولوم سيكتب على الصورة :

$$F = k\,\frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (16\text{–}2)$$

حيث تقاس F بوحدات نيوتن و r بالمتر . ويتعين ثابت التناسب k بالتجربة حيث يساوي $8.9874 \times 10^{9}\ N.m^2/C^2$. وذلك عند إجراء التجربة في الفراغ (أو على أحسن تقريب في الهواء) . وسوف نعتبر k عادة مساوية $9.0 \times 10^{9}\ N.m^2/C^2$.

ويكتب الثابت k دائمًا مساويًا $(1/4\pi\epsilon_0)$ حيث يطلق على ϵ_0 **سماحية الفراغ** ، وتتخذ القيمة التالية :

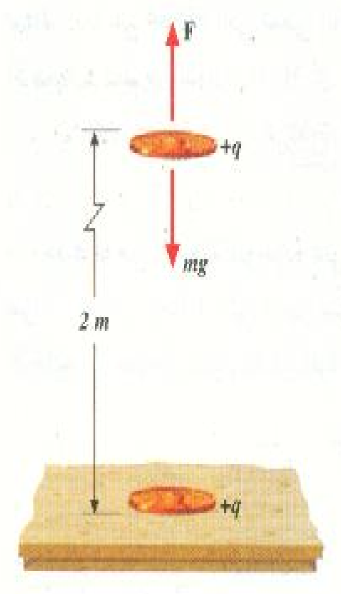
$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$$

عندما نقوم بإدخال القيم العددية في المعادلة 2–16 فسنرى أن الكولوم الواحد يعتبر كمية كبيرة جدًا من الشحنة . فلو أن لدينا شحنتين مقدار كل منهما كولوم واحد وتفصلهما مسافة مقدارها متر واحد فإن كلاً منهما تؤثر على الأخرى بقوة مقدارها تسعة بلايين نيوتن ! أما كميات الشحنة الساكنة التي نتعامل معها في حياتنا اليومية فمقاديرها عادة تقاس بالميكروكولوم أو أقل .

والكمية الأساسية للشحنة التي توجد داخل المادة هي كما ذكرنا في القسم 2–16 ، الشحنة التي يحملها الإلكترون والبروتون ويرمز لها بالرمز e . وقيمة e المعينة بالتجربة هي :

$$e = 1.60218 \times 10^{-19}\ C$$

وكما يقتضي الأمر في القسم 2–16 فإن البروتون يحمل شحنة مقدارها $+e$ والإلكترون $-e$. وكل الجسيمات الأساسية المشحونة والتي تم اكتشافها حتى الآن في المواد المعتادة تحمل شحنة مقدارها e أو مضاعفات صحيحة لها . وهكذا يتضح أن الشحنة e هي أصغر كمية ، أو كمة ، للشحنة الموجودة في الطبيعة* .



شكل 9–16:
إن كسرًا ضئيلاً من الإلكترونات هو الذي تلزم إزالته من البنس حتى تظهر القوى الكهربية الهائلة .

وتبرز التجارب سمة أخرى مهمة للقوة الكهربية ، فعندما تؤثر جسيمات مشحونة متعددة بقوة على بعضها البعض ، فإن تلك القوة تضاف إلى بعضها البعض . فعلى سبيل المثال ، لنفترض أن شحنتين كانتا قريبتين من شحنة ثالثة ، ستؤثر كل من الشحنتين بقوة حسب قانون كولوم على الشحنة الثالثة ، وتكون القوة الكلية المؤثرة على الشحنة الثالثة هي ببساطة الجمع المتجهي للقوتين المنفصلتين . وتسمى هذه الحقيقة **مبدأ التراكب** لقوى قانون كولوم وسوف تتضح كيفية استعماله في بعض الأمثلة التالية .

---

* بناء على النظريات الحديثة للجسيمات الأساسية فإن بعض تلك الجسيمات كالبروتون والنيوترون تتكون من اتحاد جسيمات (تسمى **كواركات**) وتحمل شحنات مقدارها $e/3$ أو $2e/3$. ولم يتيسر حتى الآن فصل هذه الجسيمات بالتجربة ؛ وحتى لو أمكن الحصول عليها في المستقبل ، فإن ذلك لن يغير من حقيقة أن بالطبيعة حدًا أدنى للشحنة التي يمكن تواجدها .

مثال 16-1 :

يزن « بنس » نحاسي نحو 3 g ويحتوى على نحو 3×10^{22} ذرة نحــاس . افترض أن بنسين أزيل منهما جزء من إلكتروناتهما بحيث اكتسب كل منهما شحنة موجبة خالصة مقدارها $+q$. وحين وضع أحدهما فوق منضدة فإن الآخر سيظل معلقًا في الــهواء بحيث يتزن وزنه مع القوة الكهربية ، على مسافة 2 m فوق الأول ، كما هو موضح بالشكل 9-16 .

(أ) ما هو مقدار الشحنة q التي من شأنهما المحافظة على هذا الوضع ؟

(ب) وكم عدد الإلكترونات التي لزم أن تزال من كل « بنس » ليكتسب الشحنة $+q$ ؟

(جـ) وما هو كسر ذرات النحاس التي ستفقد إلكترونا ؟

استدلال منطقي : الجزء (أ)

سؤال : ما هو وزن البنس ؟

الإجابة : الوزن $= mg = (3 \times 10^{-3}\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 0.03\ \text{N}$

سؤال : ما هي العلاقة التي تعطي القوة الكهربية المؤثرة على البنس العلوي ؟

الإجابة : نعلم من المعادلة 2-16 أن :

$$F = \frac{(9 \times 10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)q^2}{(2\ \text{m})^2}$$

حيث q هي الشحنة الموجودة على كل بنس .

سؤال : ما هي المعادلة التي تتعين منها الشحنة q ؟

الإجابة : يجب أن يكون مقدار القوة F مساويًا للوزن وهو 0.03 N ، ولذا

$$\frac{(9 \times 10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)q^2}{(2\ \text{m})^2} = 0.03\ \text{N}$$

استدلال منطقي : الجزء (ب)

سؤال : إذا عرفت q ، فما الذي يحدد عدد الإلكترونات المنتزعة ؟

الإجابة : إن كل الكترون يغادر البنس وعليه شحنة إضافيــة موجبــة $+e$ ولــهذا يكــون عدد الإلكترونات المنتزعة هو $n = q/e$.

استدلال منطقي : الجزء (جـ)

سؤال : ما هي علاقة n بكسر الذرات التي تفقد إلكترونًا ؟

الإجابة : يحتوى البنس على عدد إجمالي من الـذرات هـو $N = 3 \times 10^{22}$ ذرة . والكسر الذي سيفقد إلكترونات هو n/N .

الحل والمناقشة : وجدنا في الجزء (أ) أن

$$q^2 = \frac{(0.03\ \text{N})(2\ \text{m})^2}{9 \times 10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2}$$

وهذا يعطى :

$$q = 4 \times 10^{-6}\ C = 4\mu C$$

وعدد الإلكترونات التى أزيلت هو :

$$n = \frac{q}{e} = \frac{4\times10^{-6}\ C}{1.6\times10^{-19}\ C} = 2\times10^{13}$$

وهذا يمثل كسرًا مقداره :

$$\frac{n}{N} = \frac{2\times10^{13}}{3\times10^{22}} = 7\times10^{-10}$$

من الذرات . لاحظ أن شحنات صغيرة من فئة الميكروكولوم تؤدى إلى قوى يسهل قياسها بين أجسام كبيرة .

مثال 2-16 :

أوجد القوة المؤثرة على الشحنة q_2 التى فى الوسط فى الشكل 10-16 .

استدلال منطقى :

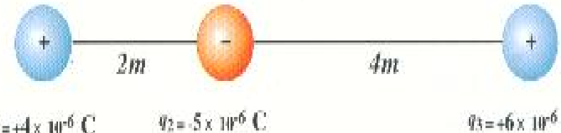
سؤال : أوجد القوة المؤثرة على الشحنة q_2 التى فى الوسط من الشكل 16-10 .

الإجابة : تؤثر كل من الشحنتين q_1 و q_3 بقوة تجاذب على q_2 . وهاتان القوتان تعارض أحداهما الأخرى كما فى الشكل 10-16 وسنطلق على القوة التى تؤثر بها q_1 على q_2 الرمز F_1 أما التى تؤثر بها q_3 فستكون F_3 .

سؤال : كيف يمكن حساب القوة المنفردة ؟

الإجابة : بتطبيق قانون كولوم على كل حالة منفردة ، كما لو كانت باقى الشحنات غير موجودة .

سؤال : كيف نتعامل مع إشارات الشحنات ؟



شكل 10-16:
تنجذب الشحنة الوسطى نحو q_1 بقوة هى F_1 ونحو q_3 ، بقوة هى F_3 .

الإجابة : لقد استخدمت بالفعل الإشارات لتحديد اتجاهات القوى وتستطيع الآن حساب مقادير القوى المعارضة ، إذا علمت أنك ستعتبر الفرق بين تلك المقادير .

الحل والمناقشة : يقدم قانون كولوم المقادير التالية للقوى المنفردة :

$$F_1 = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(4\times10^{-6}\ C)(5\times10^{-6}\ C)}{(2\ m)^2}$$

$$= 0.04\ N$$

$$F_3 = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(5\times10^{-6}\ C)(6\times10^{-6}\ C)}{(4\ m)^2}$$

$$= 0.02\ N$$

والقوة الصافية لهذه القوى المتعارضة هى باقى طرح المقدارين :

F_{net} (على q_2) $= 0.04\ N - 0.02\ N = 0.02\ N$

وتتجه هذه القوة نحو اليسار فى الشكل 10-16 .

تمرين : أوجد القوة المؤثرة على شحنة مقدارها $4\mu C$. **الإجابة** : $4\times10^{-12}\ N$.

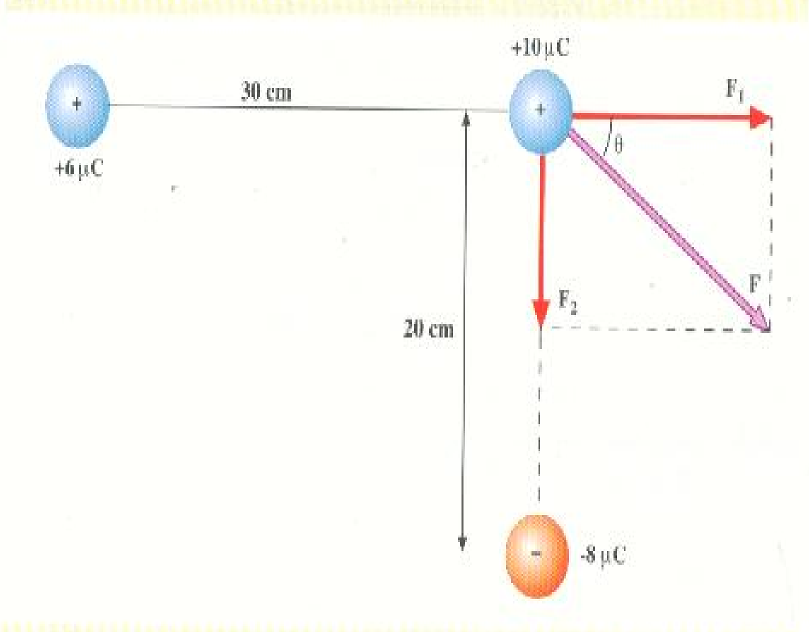
مثال 3-16 :

أوجد القوة المحصلة المؤثرة على شحنة مقدارها $+10\mu C$ موضحة فى الشكل 11-16 .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى اتجاهات القوى المنفردة المؤثرة على الشحنة $+10\ \mu C$ ؟

الإجابة : القوة F_1 التى تؤثر بها الشحنة $+6\mu C$ هى قوة تنافر نحو اليمين . أما الشحنة $-8\mu C$ فتؤثر بقوة تجاذب F_2 إلى أسفل ؟



شكل 11-16:
لإيجاد القوة المحصلة **F** المؤثرة على الشحنة $+10\mu C$ لابد أن نضيف القوى المؤثرة عليها من جانب الشحنتين الأخريين .

سؤال : ما هى العلاقة التى ستعطينا مقادير هذه القوى ؟

الإجابة : قانون كولوم .

$$F_1 = \frac{(9\times10^9\,\text{N.m}^2/\text{C}^2)(+6\mu\text{C})(+10\mu\text{C})}{(0.3\text{ m})^2}$$

$$F_2 = \frac{(9\times10^9\,\text{N.m}^2/\text{C}^2)(-6\mu\text{C})(+10\mu\text{C})}{(0.2\text{ m})^2}$$

وكما حدث فى المثال السابق ، بمجرد أن تعين اتجاه القوى فإن كل ما تحتاجه هو مقدار كل منها ، بغض النظر عن الإشارة الجبرية .

سؤال : وكيف تجمع هذه المقادير ؟

الإجابة : إنهما متجهان متعامدان ، لذا تنطبق عليهما نظرية فيثاغورس . بالنظر إلى الشكل 11-16 نجد أن

$$F_{\text{net}} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \quad \text{و} \quad \theta = \tan^{-1}\frac{F_2}{F_1}$$

الحل والمناقشة : مقادير القوى هى

$$F_1 = 6\text{ N} \quad \text{و} \quad F_2 = 18\text{ N}$$

وهذا يؤدى إلى

$$F_{\text{net}} = \sqrt{36+324}\ \text{N} = 19\text{ N}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{18.0}{6.00} = 72^\circ$$

مثال 4-16 :

أوجد القوة المؤثرة على الشحنة $+20\mu C$ المبينة فى الشكل 12-16 .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هما اتجاها القوتين المؤثرتين على الشحنة $+20\mu C$ ؟

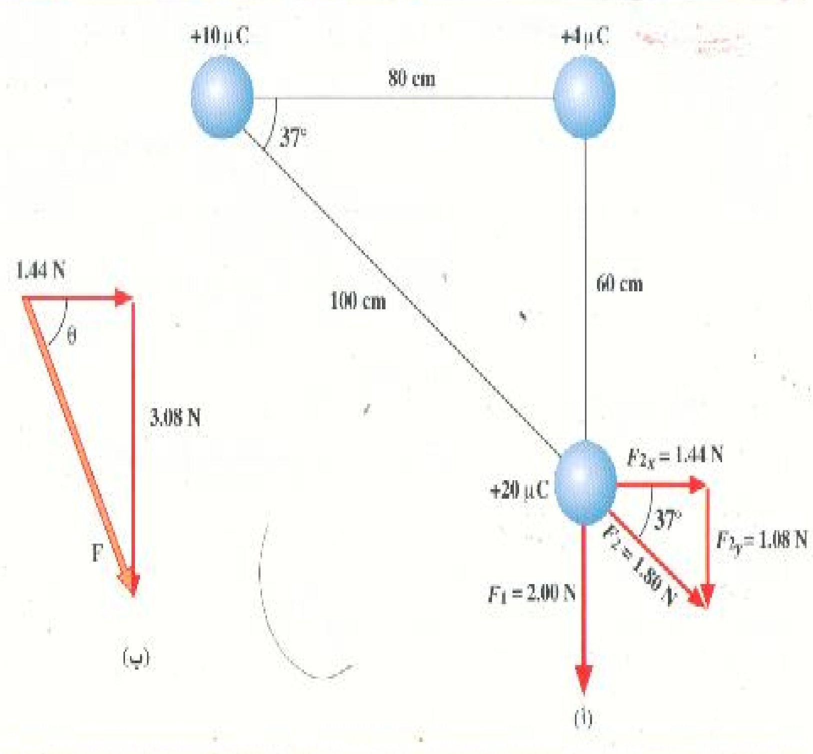
الإجابة : حيث أن الشحنات كلها موجبة لذا فكلتا القوتين تنافرية . ولهذا تكون إحدى القوى (F_1) متجهة إلى أسفل . أما الأخرى (F_2) فتميل بزاوية مقدارها 37° أسفل الخط الأفقى إلى اليمين .

سؤال : وكيف تُجمع هاتان القوتان ؟

الإجابة : يجب تحليل القوة F_2 إلى المركبتين x و y . بحيث تضاف المركبة y إلى F_1 . ومن ثم يمكن استخدام نظرية فيثاغورس لإيجاد المحصلة .

الحل والمناقشة : يقدم قانون كولوم المقدارين التاليين

$$F_1 = 2.0\text{ n} \qquad F_2 = 1.8\text{ N}$$



شكل 12–16:
تنتج القوى المتجهة المؤثرة على الشحنة $20\mu C$ القوة المحصلة F المبينة فى الشكل (ب) .

والقوة F_2 لها مركبتان هما

$$F_{2x} = (1.8\ N) \cos 37° = 1.4\ N$$

$$F_{2y} = (1.8\ N) \sin 37° = 1.1\ N$$

ولهذا تكون مركبتا القوة المؤثرة النهائية هما

$$F_y = 2.0\ N + 1.1\ N = 3.1\ N \quad \text{و} \quad F_x = 1.4\ N$$

ومن ثم

$$F = \sqrt{1.4^2 + 3.1^2}\ N = 3.4\ N$$

و

$$\theta = \tan^{-1} \frac{3.1}{1.4} = 66°$$

تمرين : أوجد مقدار القوة المؤثرة على الشحنة $10\mu C$. **الإجابة** : 2.3 N .

16-10 المجال الكهربى

لقد وجد أنه من المناسب مناقشة القوى الكهربية بدلالة مفهوم يطلق عليه **المجال الكهربى** . ويفى هذا المفهوم فى الكهربية بنفس الغرض الذى يفى به مفهوم مجال الجاذبية فى الميكانيكا . وقبل أن نبدأ فى مناقشة هذا المفهوم الجديد بالتفصيل سنقوم بمراجعة الموقف الأكثر شيوعًا لمجال الجاذبية .

لقد اعتدنا على حقيقة أن الكرة الأرضية تؤثر بقوة الجاذبية المتجهة نحو مركزها على الأجسام الموجود على السطح أو فوقه . ويؤثر القمر والكواكب الأخرى بقوى مماثلة

على الأجسام القريبة منها . ولكى نصف هذه التأثيرات فإننا نقول أن هناك **مجالاً للجاذبية** فى هذه المناطق . وعند أية نقطة فإن المجال يعتبر فى اتجاه القوة التى يتأثر بها الجسم هناك . وتكون شدة المجال متناسبة مع شدة تلك القوة .

ومن المناسب أن نخطط مجالات الجاذبية ؛ وبالنسبة للكرة الأرضية فإن مجال الجاذبية يبدو كما هو موضح فى الشكل 13-16 الذى يمكن تفسيره على النحو التالى : لو أن جسمًا وضع عند النقطة A ، فإنه سيتأثر بقوة فى اتجاه رأس السهم نحو مركز الأرض . أما الخطوط وتسمى **خطوط المجال** فإنها تشير إلى اتجاه جذب الأرض ؛ وهو ما يعتبر اتجاه مجال الجاذبية (وفى الحقيقة فإن الشكل 13-16 لابد وأن يرسم فى أبعاد ثلاثة . بحيث تتجه خطوط القوة دائما ومن جميع الاتجاهات نحو مركز الأرض) .

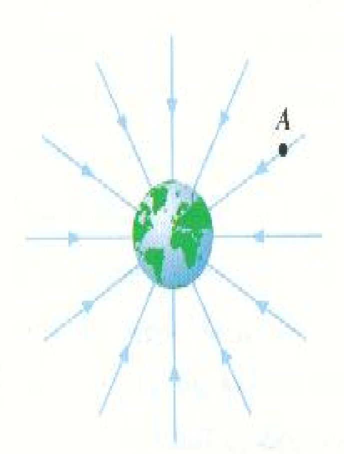
وخطوط المجال لا تمثل اتجاه القوة فحسب ولكنها تعتبر مؤشرًا على المقدار النسبى لها . ويمكنك ملاحظة ذلك فى الشكل 13-16 حيث تكون الخطوط أكثر تقاربًا من بعضها البعض بالقرب من الأرض ، حيث تكون القوة كبيرة ، وذلك بالمقارنة مع الوضع بعيدًا عن الأرض حيث تكون القوة أضعف . وسوف نعود إلى هذه السمة لخطوط المجال بعد أن نناقش المجال الكهربى ، الذى يصف القوى الكهربية التى تؤثر بها الأجسام المشحونة على بعضها البعض ويمثل المجال الكهربى القوة الكهربية التى تتأثر بها شحنة موجبة ساكنة . ولننظر كيف يمكنك المضى قدمًا نحو تعيين المجال الكهربى فى منطقة ما . فيمكنك ببساطة وضع جسم مشحون (وسنطلق عليه شحنة اختبار) فى المنطقة المذكورة . ثم نقوم بحساب القوة المؤثرة عليه من جانب الشحنات الأخرى كلها . على أن شحنة الاختبار تؤثر هى الأخرى بقوى على كل الشحنات الأخرى الموجودة بجوارها . . ولو أن هذه الشحنات كانت داخل فلز (معدن) فإنها ستبدأ فى التحرك . وللتغلب على هذه الصعوبة فسنتخيل أن شحنة الاختبار تتمتع بخاصية فريدة وهى أن : **شحنة الاختبار** ما هى **إلا شحنة وهمية لا تؤثر بأية قوى على الشحنات القريبة منها** . وسنقوم بالرمز لها بالحرف q_t . ويمكننا ـ من الناحية العملية ـ تقريب مفهوم شحنة الاختبار باستخدام شحنة ضئيلة للغاية لا تؤثر على الشحنات المجاورة إلا بقدر مهمل تمامًا .

سنعتبر اتجاه المجال الكهربى فى نقطة ما على أنه نفس اتجاه القوة المؤثرة على شحنة اختبار **موجبة** موضوعة فى تلك النقطة . ولنفترض مثلاً أن شحنة اختبار موجبة قد وضعت عند النقطة A فى الشكل 14-16 (أ) . إنها تنجذب قطريًا إلى الداخل ، كما يوضح السهم المرسوم عند A وبالفعل ، فإن القوة المؤثرة على شحنة الاختبار الموجبة ستتجه قطريًا إلى الداخل بغض النظر عن الموقع الذى تشغله بجوار الشحنة السالبة الموجودة بالمركز . وعلى هذا فإننا سنخمن أن المجال الكهربى يتجه كما هو موضح بالأسهم : **يتجه المجال الكهربى بالقرب من شحنة سالبة نحو الشحنة نفسها** .

ويمكننا أيضًا تعيين اتجاه المجال بالقرب من شحنة موجبة بنفس الأسلوب ، كما هو موضح فى الشكل 14-16 (ب) . وشحنة الاختبار الموجبة تدفع قطريًا إلى الخارج بتأثير



تعتبر صاعقة البرق دليلاً دراميًا على أنه حين يكون المجال الكهربى بين الشحنات الموجودة على سطح الأرض وتلك التى بالسحب ، كبيرًا بدرجة كافية فإن فيضًا من الشحنات يسرى . لاحظ صاعقة البرق الصغيرة عند هوائى التليفزيون إلى اليسار . . وحتى هذا من شأنه أن يتلف جهاز التليفزيون بالمنزل . . ولك أن تتخيل ماذا يمكن أن يحدث لو أن الصاعقة الرئيسية ضربت الهوائى بدلاً من أن تضرب الشجرة .



شكل 13-16:
يتجه مجال جاذبية الأرض قطريًا إلى الداخل ويشتد كلما اقتربنا من الأرض .

الشحنة الموجبة الموجودة بالمركز . ولذلك **يتجه المجال الكهربى بالقرب من شحنة موجبة قطريًا بعيدًا عن الشحنة .**

شكل 14-16:
يتجه المجال الكهربى قطريًا إلى الداخل نحو شحنة سالبة وإلى الخارج بعيدًا عن شحنة موجبة .

(ب) (أ)

والخطوط الموجهة التى رسمناها فى الشكل 14-16 لبيان اتجاه الكهربى ، تسمى **خطوط المجال الكهربى** . وكما رأينا فإن خطوط المجال الكهربى تنبع وتتجه بعيدًا عن الشحنات الموجبة ، وتصب وتتجه نحو الشحنات السالبة .

ولكى يكتسب مفهوم المجال الكهربى معنى كميًا ، فإننا سنعرف كمية تسمى **شدة المجال الكهربى E** . ويكون اتجاه **E** عند أية نقطة معينة باعتباره كمية متجهة هو نفس اتجاه خطوط المجال الكهربى المارة خلال تلك النقطة . أما مقدار **E** فهو يساوى القوة التى تتأثر بها شحنة الاختبار مقسومة على مقدار تلك الشحنة q_t :

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_t \qquad (16\text{–}3)$$

وهكذا فإن وحدات **E** ستعرف على أنها N/C . وحيث أن **E** هى قوة لوحدة الشحنات ، فإننا دائمًا ما ننص على أنها قوة لوحدة شحنات الاختبار الموجبة . على أن علينا إدراك أنه عند قياس شدة مجال كهربى قد نستخدم شحنة أصغر بكثير من 1 C حتى لا نثير أى اضطراب للشحنات الأخرى الموجودة بجوارها .

وكما هو الحال مع مجال الجاذبية فإن الشدة النسبية للمجال الكهربى يمكن تقديرها عند فحص الشكل البيانى لخطوط المجال . فخطوط المجال فى الشكل 14-16 مثلاً ، أقرب ما تكون من بعضها البعض بالقرب من الشحنات . والقوة المؤثرة على وحدة شحنة الاختبار الموجبة (أو شدة المجال الكهربى) تكون أكبر ما يمكن بالقرب من الشحنات . أى أن شدة المجال الكهربى أكبر ما يمكن حيث تتقارب خطوط المجال إلى أقصى حد لها . ودائمًا ما نقدر قيمة شدة المجال فى منطقة ما ، وذلك بملاحظة كثافة خطوط المجال فى تلك المنطقة من خلال تخطيط للمجال الكهربى .

16-11 المجال الكهربى لشحنة نقطية

إننا مهتمون دائمًا بالمجال الكهربى الذى يولده أيون ما أو جسيمات مشحونة أخرى لها أبعاد ذرية ، وفى معظم الأحوال يمكننا اعتبار هذه الكيانات شحنًا نقطية . بل وحتى

$+q \quad r \quad P \quad \mathbf{E}$

شكل 15-16:
لإيجاد المجال الكهربى E عند النقطة P لابد أن نحسب القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة موضوعة فى تلك النقطة .

الكرة المشحونة تسلك سلوك شحنة نقطية تحت ظروف معينة كما سنشير بعد قليل ؛ ولهذا أصبح من المهم لنا أن نتعرف على المجال الكهربى الذى تنشؤه شحنة نقطية .

لنفترض أننا نود حساب شدة المجال الكهربى عند نقطة P فى الشكل 15-16 والتى تقع على مسافة r بعيدًا عن شحنة نقطية موجبة q ونعلم أن المجال الكهربى للشحنة q يتجه قطريًا للخارج ، كما اتضح لنا من الشكل 14-16 (ب) ، ولذلك فإن $\mathbf{E}$ عند النقطة P ستكون فى الاتجاه المبين بالشكل . ولو تخيلنا وجود شحنة اختبار q_t عند النقطة P ، فإن القوة المؤثرة عليها ستعطى من قانون كولوم :

$$F = k\,\frac{qq_t}{r^2}$$

وإذا قسمنا الطرفين على q_t لنحصل على F/q_t ، وهى شدة المجال الكهربى لوجدنا :

$$\frac{F}{q_t} = k\frac{q}{r^2}$$

ومنها :

$$E = k\frac{q}{r^2} \qquad (16\text{–}4)$$

بالنسبة لشحنة نقطية .

وعندما تكون q موجبة فإن المجال الكهربى يتجه قطريًا إلى الخارج ، أما إذا كانت q سالبة فإن المجال سيتجه قطريًا إلى الداخل .

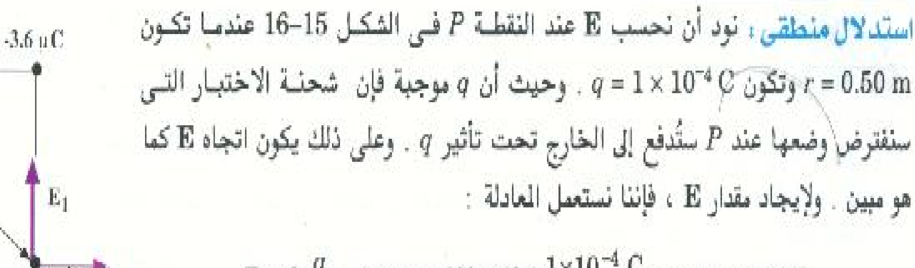
ويمكننا أن نجعل هذه العلاقة تمتد لتشمل موقفًا مهمًا آخر ؛ للمجال الكهربى حول كرة متجانسة الشحنة . عند مسافة كبيرة بعيدًا عن الكرة المشحونة (ولتكن الشحنة موجبة) فإنها تبدو كشحنة نقطية وعليه تكون خطوط المجال الناجمة عنها ممتدة قطريًا من الكرة إلى الفضاء من حولها . وحيث أن الشحنة على الكرة منتظمة ، لذا تكون الخطوط على أبعاد منتظمة من بعضها البعض حول الكرة . وكلما اقتربنا من الكرة فإن الخطوط لابد وأن تظل على أبعاد منتظمة من بعضها البعض . ولهذا فحتى بالقرب من الكرة فإن الخطوط تظل قطرية وشبيهة بتلك التى لشحنة نقطية . ومن ثم يكون المجال الناشىء عن كرة مشحونة بشكل منتظم ، شبيهًا بالمبين فى الشكل 14-16 والخاص بشحنة نقطية . ولنا الآن أن نستنتج أن :

المجال خارج كرة مشحونة بانتظام هو الذى تنشؤه شحنة نقطية مساوية لشحنة الكرة وموضوعة عند مركزها .

ولهذا تنطبق المعادلة 4-16 على كرة مشحونة بانتظام مثلما تنطبق على شحنة نقطية . على أنه لابد من ملاحظة أنها تنطبق فقط على المنطقة الواقعة خارج الكرة .

مثال توضيحى 1-16

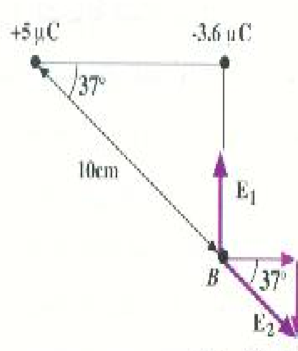
أوجد شدة المجال الكهربى على بعد 50 cm من شحنة نقطية موجبة مقدارها 1×10^{-4} C .



استدلال منطقى : نود أن نحسب **E** عند النقطة P فى الشكل 15-16 عندما تكون $r = 0.50\ m$ وتكون $q = 1 \times 10^{-4}\ C$. وحيث أن q موجبة فإن شحنة الاختبار التى سنفترض وضعها عند P ستُدفع إلى الخارج تحت تأثير q . وعلى ذلك يكون اتجاه **E** كما هو مبين . ولإيجاد مقدار **E** ، فإننا نستعمل المعادلة :

$$E = k\frac{q}{r^2} = (9 \times 10^9\ N/m^2/C^2)\frac{1\times10^{-4}\ C}{(0.50\ m)^2} = 3.6 \times 10^6\ N/C$$

تمرين : ما هى شدة المجال عند P إذا كانت الشحنة عبارة عن كرة مشحونة بانتظام ونصف قطرها 3.0 cm ؟ **الإجابة :** $3.6 \times 10^6\ N/C$.



شكل 16-16:
أوجد مبررًا للاتجاهات المبينة لكل من E_1 و E_2 . كيف يمكن إيجاد المجال الكلى عند B ، والناشىء بسبب الشحنتين ؟

مثال 16-5 :

أوجد مقدار **E** عند النقطة B فى الشكل 16-16 والناشىء عن شحنتين نقطيتين .

استدلال منطقى :

سؤال : هل ينطبق مبدأ التراكب على حساب المجال الكلى عند B ؟

الإجابة : نعم ، يمكن حساب المجال عند B ، والناشىء عن كل شحنة من المعادلة 16-4 . ثم يجمع المجالان المنفردان متجهيًا .

سؤال : ما الذى يحدد اتجاه المركبات المتجهية للمجال ؟

الإجابة : لنتذكر أن المجال الناشىء عن شحنة موجبة يتجه قطريًا إلى الخارج بعيدًا عن الشحنة . أما المجال الناشىء عن شحنة سالبة فيتجه قطريًا نحو الشحنة . وعلى هذا يكون لدينا الإسهامان E_1 ، E_2 فى الاتجاهين المبينين فى الشكل 16-16 .

سؤال : ما الذى يحدد مقدارى E_1 و E_2 ؟

الإجابة : المعادلة 16-4 تعطينا مقدار المجال الناشىء عن شحنة نقطية منفردة .

$$E_1 = \frac{(9 \times 10^9\ N.m^2/C^2)(-3.6\times10^{-6}\ C)}{(0.10\ m\ \sin 37°)2}$$

$$E_2 = \frac{(9 \times 10^9\ N.m^2/C^2)(5\times10^{-6}\ C)}{(0.10\ m)}$$

الحل والمناقشة : مقادير شدة المجالات المنفردة هى

$$E_1 = 9.0 \times 10^6\ N/C \qquad E_2 = 4.5 \times 10^6\ N/C$$

والمركبات المتعامدة للمجال E_2 هى

$$\mathbf{E}_{2x} = E_2 \cos 37° = 3.6 \times 10^6\ N/C$$

$$\mathbf{E}_{2y} = -E_2 \sin 37° = -2.7 \times 10^6\ N/C$$

وتكون مركبات **E** هى :

$$E_x = 3.6 \times 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_y = (9.0 - 2.7) \times 10^6 \text{ N/C}$$

وهذا يعطى :

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 7.3 \times 10^6 \text{ N/C}$$

تمرين : إثبت أن اتجاه **E** هو $60.3°$ فوق الخط الأفقى .

مثال توضيحى 2-16

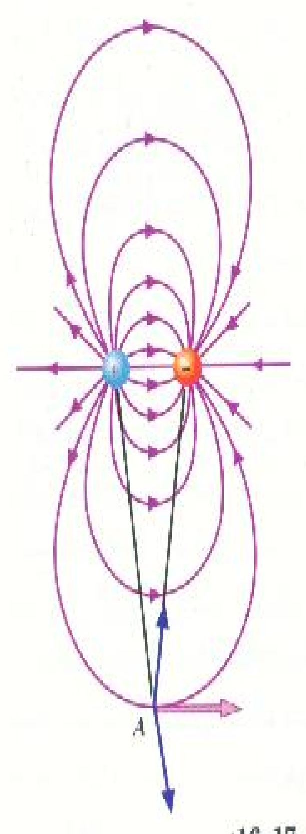
إذا وضعت شحنة مقدارها $q = +4 \times 10^{-7}$ عند النقطة B فى المثال 5-16 فما هى القوة التى ستؤثر عليها من المجال الكهربى ؟

استدلال منطقى : يمكننا استعمال قانون كولوم وحساب القوة كما فى الأمثلة السابقة . على أننا بمجرد أن نحسب المجال **E** عند النقطة B ، فإن القوة التى تتأثر بها أية شحنة q عندما توضع عند تلك النقطة ستكون ببساطة $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. ولهذا فإن مقدار القوة هو :

$$F = (+4 \times 10^{-7} \text{ C})\ (7.3 \times 10^6 \text{ N/C}) = 2.9 \text{ N}$$

ويكون اتجاه القوة هو اتجاه $q\mathbf{E}$. وفى حالة شحنة موجبة فإن **F** تكون فى اتجاه **E** ، أما إذا كانت الشحنة سالبة فإن **F** تكون فى اتجاه **E-** أو فى اتجاه عكس **E** .

12-16 المجال الكهربى بسبب توزيعات مختلفة للشحنة : قانون جاوس

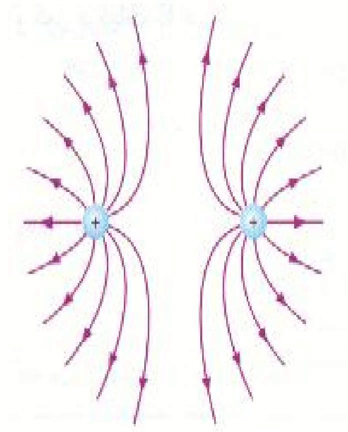


شكل 17-16:
تنبع خطوط المجال الكهربى عند الشحنة الموجبة وتنتهى على الشحنة السالبة . وعند أية نقطة مثل A يكون المجال الكهربى فى اتجاه مماس لخط المجال المار خلال تلك النقطة .

إن بإمكاننا أن نحصل على قدر كبير من التعمق فى مسألة ما بفحص تخطيط المجال الكهربى المتصل بها اتصالاً وثيقاً . وعلينا تذكر التفسيرات التالية :

1. تبدأ خطوط المجال الكهربى عند الشحنات الموجبة وتنتهى عند الشحنات السالبة .
2. يكون المجال الكهربى أقوى ما يمكن عندما تكون خطوط المجال عند أقصى كثافة لها .
3. تكون القوة المؤثرة على شحنة موجبة موضوعة عند نقطة فى المجال متجهة بامتداد المجال عند تلك النقطة . أما القوة المؤثرة على شحنة سالبة فتكون متجهة فى عكس اتجاه المجال .

ويمكننا من حيث المبدأ تعيين اتجاه المجال الكهربى الناشىء عن الشحنات المبينة فى الشكل 16-16 عند أى عدد من نقط الفضاء المحيط بها . وقد يكون هذا العمل شاقاً من الناحية العملية ويستحسن القيام به بمساعدة الكومبيوتر . وإذا كانت النقط قريبة من بعضها البعض بدرجة كافية ، فإننا نستطيع أن نرسم مخططاً لاتجاه المجال من شأنه



شكل 18-16:
تبدو خطوط القوة حول شحنتين متشابهتين وهي تتنافر مع بعضها البعض . لماذا لزم أن يكون الموقف هكذا ؟

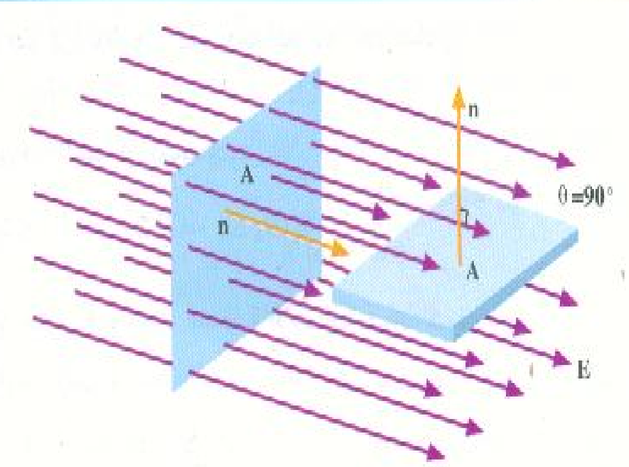
أن يفيدنا بيانيًا بالكثير عن المجال الكهربي في الفضاء المحيط بالشحنات ؛ والشكل 17-16 يعبر عن تخطيط مثل هذا المجال بالنسبة لشحنتين متضادتين ومتساويتين . وعليك أن تفحص عدة نقط في الشكل حتى تقنع نفسك أن شحنة موجبة موضوعة هناك سوف تتأثر بقوة في الاتجاه الذي تشير إليه خطوط القوة . ولكي تدرك كيفية عمل هذا ، اعتبر النقطة A . إذا وضعت شحنة اختبار موجبة عند A فإنها ستجد تنافرًا مع الشحنة الموجبة وتجاذبًا مع الشحنة السالبة . وستكون قوة التجاذب مساوية لقوة التنافر وذلك لأن شحنة الاختبار قريبة من الشحنة الموجبة بنفس درجة قربها من الشحنة السالبة . ومحصلة هاتين القوتين تكون مماسة لخط القوة عند A .

وخريطة المجال القائم بجوار شحنتين متساويتين ومتشابهتين يوضحها الشكل 18-16 . ولابد أن تكون قادرًا على إثبات أن المجال يكون صفرًا عند نقطة منتصف المسافة بين الشحنتين .

وفي كثير من الحالات ذات الأهمية تكون الشحنة موزعة على أشكال لها هندسة بسيطة مثل الكرات والخطوط أو المستويات . وهناك وسيلة قوية للغاية يمكن من خلالها تبسيط حساب شدة المجال الكهربي في مثل هذه الحالات وتعرف باسم **قانون جاوس** . ولكي نفهم المغزى الكامن وراء هذا القانون ، دعنا نعتبر سطحًا مغلقًا وموجودًا في منطقة المجال الكهربي . وليس من الضروري أن يكون هذا السطح . . سطحًا ماديًا لجسم حقيقي ؛ إذ قد يكون أي سطح **افتراضي** (ويطلق عليه **سطح جاوسي**) تختاره طالما كان يحيط بحجم ما من الفضاء . ولتفكر الآن في تقسيم هذا السطح إلى عناصر مساحية صغيرة ΔA ، ، بحيث يكون لكل عنصر اتجاه يمكن وصفه بدلالة العمود المقام على ΔA ؛ $\mathbf{n}$ ، والذي يشير إلى خارج المنطقة التي يحيط بها السطح . ويكون لخطوط المجال الكهربي التي تمر خلال ΔA مركبة هي $E_\perp = E\cos\theta$ موازية للمتجه $\mathbf{n}$ ، حيث θ هي الزاوية المحصورة بين $\mathbf{E}$ و $\mathbf{n}$ (الشكل 19-16) . سنقوم الآن بضرب كل عنصر ΔA في $E_\perp$ لنحصل على كمية نطلق عليها **التدفق الكهربي** أو **الفيض الكهربي** $(E_\perp \Delta A)$ المار خلال ΔA . لاحظ أن $E_\perp$ (ومن ثم التدفق) قد يكون موجبًا أو سالبًا اعتمادًا على قيمة $\cos\theta$ كما يوضح ذلك الشكل 20-16 . وحيث أن شدة المجال الكهربي تمثل بكثافة خطوط المجال ، فقد نعتبر التدفق (الفيض) بمثابة عدد خطوط المجال المارة خلال مستوى ΔA .

يوضح الشكل 21-16 مثالاً لسطح جاوسي مقسم إلى عناصر مساحية صغيرة ويقع في منطقة بها مجال كهربي منتظم تشير إليه خطوط المجال . لاحظ أن التدفق خلال بعض عناصر المساحة سالب ، بينما يكون موجبًا خلال عناصر أخرى ، بل إنه يكون في بعض الحالات صفرًا حين يتعامد كل من $\mathbf{n}$ و $\mathbf{E}$. والآن ، ما هي النتيجة التي نصل إليها عندما نجمع كل إسهامات الفيض هذه حتى نغطي السطح الجاوسي بأسره ؟ إن **قانون جاوس** هو الذي يتولى الإجابة :

إن مجموع كل إسهامات التدفق الكهربي المار من سطح مغلق يتناسب مع القيمة الإجمالية للشحنة المحتواة داخل ذلك السطح .

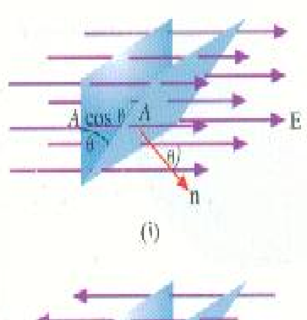


شكل 19-16:
إذا كانت المساحة الموجودة بالرسم هى A ، فإن التدفق الكهربى خلال المساحة اليسرى ، عندما يكون n موازيًا للمجال E ، هو EA . أما إذا كان n عموديًا على E فإن التدفق المار خلال المساحة اليمنى يكون صفرًا .

ففى حالة الشكل 21-16 ، لا يحتوى السطح على أية شحنة ولذا فإن التدفق الكلى خلال السطح يكون صفرًا ؛ بمعنى أنه على قدر ما يغادر المنطقة المحصورة من خطوط المجال ، على قدر ما يدخل إليها .

وحيث أن الشحنات هى منبع (أو منتهى) خطوط المجال الكهربى ، فإن الطريقة الوحيدة التى من خلالها يتكون تدفق خالص للمجال الكهربى خلال سطح مغلق ، هى أن يكون بداخل ذلك السطح شحنة خالصة .

والتعبير الرياضى الدقيق لقانون جاوس هو :



$$\Sigma (E\Delta A) = 4\pi k \, \Sigma q \text{ (المحتواة) } = \frac{Q_{tot} \text{ (المحتواة) }}{\epsilon_0} \qquad (16\text{-}5)$$

وفى هذه المرحلة لو إنك ظننت أن قانون جاوس يثير البلبلة أكثر مما يفيد فقد تكون على حق . فالعادلة 5-16 قابلة للحل جبريًا فقط فى الحالات التى يكون توزيع الشحنات فيها ذا هندسة بسيطة بحيث يسمح لنا باختيار أسطح بسيطة . ولنعتبر ثلاثة من هذه المواقف البسيطة . تماثل كروى ، تماثل أسطوانى ، وتماثل استوائى .

شكل 20-16:
تعتمد إشارة التدفق الكهربى على الزاوية المحصورة بين العمود المقام على المساحة والمجال الكهربى . ففى الشكل (أ) يكون التدفق هو $+(E\cos\theta)A$ بينما فى الشكل (ب) هو $-(E\cos\theta)A$. لاحظ أن هذه النتيجة هى نفس ما ستحصل عليه لو اعتبرت التدفق المار خلال المساحة الفعالة $A\cos\theta$.

التماثل الكروى

من أمثلة التماثل الكروى ؛ الشحنات النقطية ، والشحنات الموزعة بانتظام فوق الأسطح أو الحجوم الكروية . ولنعتبر شحنة كلية مقدارها $+Q$ منتشرة بانتظام فوق كرة مفرغة وخاوية ونصف قطرها R كما فى الشكل 22-16 (أ) . وعند أية نقطة ولتكن A خارج الكرة فإننا نستطيع استخدام اعتبارات التماثل لإثبات أن كل المركبات المستعرضة (أى المركبات العمودية على الاتجاه القطرى) للقوة والمؤثرة على شحنة اختبار ومن ثم اتجاه المجال E تتجه قطريًا نحو الخارج انطلاقًا من مركز الكرة . كما تتيح لنا اعتبارات التماثل أن نقول بأن كل النقط الواقعة عند نفس المسافة r من المركز تكون متكافئة . وإذا اخترنا السطح الجاوسى على هيئة كرة (ذات اللون الأخضر) . نصف قطرها r (يمر خلال A) ، فإننا نستطيع أن نضع النصوص التالية :

1 للمجال E نفس المقدار عند كل النقط الواقعة على السطح الجاوسى ؛ حتى وإن كنا لا نعرف ما هو ذلك المقدار بعد .

2 $\mathbf{E}$ عمودى على السطح الجاوسى عند كل النقط ولذا فهو يتجه قطريًا نحو الخارج انطلاقًا من مركز الكرة .

وتمكننا هذه المعلومات من حساب الطرف الأيسر من قانون جاوس :

$$\Sigma (E_{\perp} \Delta A) = E \Sigma \Delta A = E (A_{\text{للكرة}}) = E (4\pi r^2)$$

أما المقدار الذى بالطرف الأيمن لقانون جاوس فهو مجرد الشحنة الإجمالية فوق الكرة المجوفة أو Q . وهكذا فإن قانون جاوس يؤدى إلى الحل الخاص بالمقدار E :

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \qquad r \geqslant R \qquad (16\text{–}6) \text{ (أ)}$$

شكل 21-16:
المتجه العمودى $\mathbf{n}$ يكون متعامدًا مع كل من مستوى كل عنصر مساحة صغيرة . وبالنسبة لعنصر من السطح الجاوسى المغلق فإن $\mathbf{n}$ يتجه إلى خارج المنطقة المحصورة (المحاطة) . والتدفق خلال كل عنصر للمساحة هو $(E\cos\theta)\Delta A$ (مأخوذًا عن إدوارد . م . بيرسل ، « الكهربية والمغناطيسية » ، ممن مقرر فيزياء بيركلى ، المجلد الثانى . دار نشر ماكجروهيل. نيويورك 1965 ، ص 22 . وهى هدية من مركز تطوير التعليم . نيوتن ، ولاية ماساتشوستس).

شكل 22-16:
تطبيق قانون جاوس على توزيع كروى التماثل للشحنة ممثلاً بكرة نصف قطرها R . (أ) السطح الجاوسى عندما $r > R$ (المميز باللون الأخضر) يحيط بشحنة كلية مقدارها $+Q$. ويكون المجال الكهربى عند النقطة A هو نفسه كما لو كانت الشحنة Q نقطية وموضوعة عند مركز الكرة . (ب) السطح الجاوسى عندما $r < R$ لا يحيط بأية شحنة ولذا فإن المجال الكهربى يكون صفرًا عند كل النقط مثل A . (جـ) السطح الجاوسى عند $r > R$ ولكنه يحيط بشحنة صافية مقدارها صفر ولذا فإن المجال الكهربى عند A يكون صفرًا . (د) عندما $r < R$ فإن السطح الجاوسى يحيط بشحنة مقدارها $-Q$ ، والمجال عند أية نقطة A داخل الشحنة الكروية يكون كما لو أن الشحنة الخارجية $+Q$ ليست موجودة على الإطلاق .

وهذا يوضح أنه ، **بالنسبة للنقط التى إما على التوزيع الكروى للشحنات أو خارجه** فإن المجال الكهربى سيكون نفس المجال الذى ينشأ كما لو كانت الشحنات كلها عند مركز الكرة . فإذا كانت الشحنة على الكرة هى $-Q$ فسنحصل على نفس النتيجة باستثناء أن اتجاه $\mathbf{E}$ سيكون قطريًا إلى الداخل .

دعنا الآن نختار سطحًا جاوسيًا داخل الكرة المجوفة ($r < R$) كما في الشكل 16-22 (ب) . إن نفس اعتبارات التماثل لازالت قائمة والطرف الأيسر من قانون جاوس هو أيضًا $E\,(4\pi r^2)$. ولكن بما أننا نعتبر الكرة خاوية ، فإن السطح **لا يحتوى بداخله على أية شحنات** ولذا يصبح قانون جاوس كالتالى :

$$E\,(4\pi r^2) = 0 \qquad r < R \qquad \text{(16-6) (ب)}$$

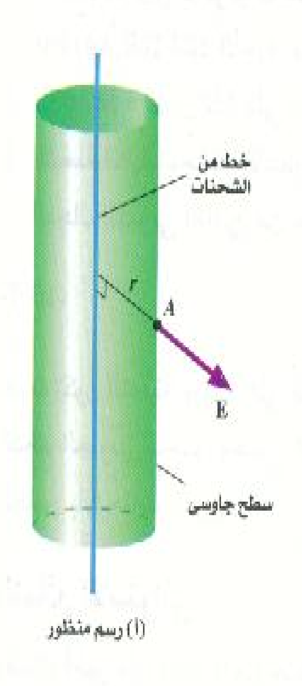
بما يعنى أن :

$$E = 0$$

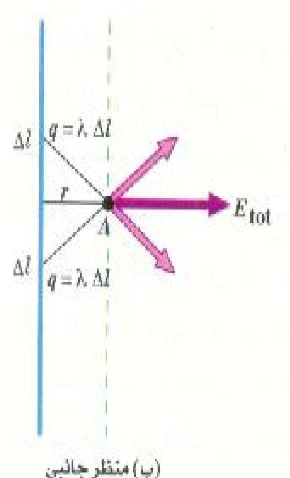
عند كل النقط داخل الكرة المشحونة المجوفة .

أما في الشكل 16-22 جـ ، د ، فقد قمنا بوضع شحنة نقطية $-Q$ في مركز نفس الكرة المشحونة ، ويحتفظ هذا الوضع بالتماثل الكروى السابق بأكمله . وإذا اعتبرنا نفس السطح الجاوسى كما سبق لوجدنا أن السطح الخارجي لا يحيط بأية شحنة صافية ، بينما يحيط السطح الداخلي بشحنة صافية مقدارها $-Q$. ويمكننا على الفور استنتاج أن المجال الناشئ عن توزيع الشحنات في الشكل 16-22 جـ و د هو :

$$E = \begin{cases} 0 & r \geqslant R \\ \dfrac{-Q}{4\pi\epsilon_0} & r < R \end{cases}$$



(أ) رسم منظور



(ب) منظر جانبي

شكل 16-23:
خط طويل جدًا يحمل شحنة ذات كثافة خطية منتظمة λ . ويكون السطح الجاوسى المناسب فى هذه الحالة عبارة عن أسطوانة تتمحور حول الشحنة الخطية . لاحظ فى (ب) أن المساهمات فى المجال الكهربى الموازى لخط الشحنات من جانب أزواج العناصر النقطية المختارة تكون متماثلة بحيث تتلاشى ولهذا فإن المجال يكون قطريًا ومتجها إلى الخارج منطلقًا من الشحنة الخطية .

التماثل الأسطوانى

دعنا الآن نعتبر خطًا مستقيمًا وزعت عليه شحنة (سواء موجبة أو سالبة) بشكل منتظم كما هو في الشكل 16-23 . ويمكننا تمييز هذه الشحنة **بكثافتها الخطية** أو بمقدار الشحنة لوحدة الأطوال (المتر) . والرمز المستعمل عادة للكثافة الخطية للشحنة هو λ وتقاس بوحدات كولوم لكل متر . وسوف نختار نقطة ما A على مسافة عمودية r من الخط . ولو أن الخط كان ممتدًا بشكل « لا نهائى » فى كلا الاتجاهين فإننا نستطيع عندئذ أن نلجأ إلى بعض الاعتبارات التماثلية المبسطة . فمن الناحية العملية فإن الطول اللانهائى يعنى أن طول خط الشحنات أكبر بكثير جدًا من المسافة r . وتكون المركبات المستعرضة للقوة والمؤثرة على شحنة اختبار موجبة موضوعة عند A من جانب قطاعات الشحنة الخطية المختلفة سيلاشى بعضها بعضًا كما هو موضح فى الشكل 16-23 (ب) . وستكون القوة المؤثرة على q_t ومن ثم **E** فى اتجاه قطرى فقط منطلقة من أو إلى الخط اعتمادًا على ما إذا كانت الشحنة الخطية موجبة أو سالبة . ومرة أخرى فإن التماثل يتيح لنا أن نعتبر أيضًا أن **كل** النقط الواقعة على نفس المسافة r تكون متكافئة ولذا فإن لها نفس قيمة المجال E . وسوف تقع هذه النقط على سطح **أسطوانة** يكون محورها هو الشحنة الخطية .

إذا أردنا تطبيق قانون جاوس على توزيع الشحنة هذا فإننا نختار السطح الجاوسى على هيئة أسطوانة قصيرة نسبيًا ، ذات طول L ونصف قطر r ، كما هو مبين باللون الأخضر فى الشكل 16-23 (أ) . وباستعمال اعتبارات التماثل نستطيع أن نستنتج أن :

1 المجال **E** ليس له مركبات عمودية عند سطحي نهايتي الأسطوانة ، ولهذا فإن $\Sigma(E_{\perp}\Delta A) = 0$ لتلك الأجزاء من السطح .

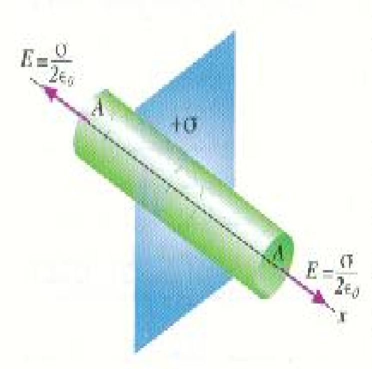
2 $\Sigma(E_{\perp}\Delta A) = E(2\pi rL)$ على المساحة الجانبية للأسطوانة .

3 الشحنة الكلية المحاطة بالأسطوانة هي $Q = \lambda L$ وهكذا فإن قانون جاوس يقدم لنا قيمة المجال الكهربي الناشئ عن خط لا نهائي ومنتظم من الشحنات :

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \qquad (16\text{–}7)$$

عندما تكون الشحنة موزعة على قشرة أسطوانية نصف قطرها R فإننا نستطيع اختيار السطح الجاوسي داخل وخارج R لحساب E بطريقة مشابهة لما حدث في القسم الخاص بالشحنات الكروية .

التماثل الاستوائي



شكل 24–16:
مستوى يحتوي على كثافة سطحية منتظمة للشحنة σ .

وكمثال أخير على فائدة قانون جاوس فإننا سنقوم الآن بدراسة حالة شحنة موزعة بانتظام على مستوى لا نهائي كما هو موضح في الشكل 24–16 . ومرة أخرى نذكر بأن كلمة « لا نهائي » تعني أننا سنظل على مسافة قريبة بما فيه الكفاية من المستوى عند إجراء الحسابات بحيث تكون المسافة x بيننا وبين المستوى أقل بكثير جدًا من أبعاد المستوى وأننا سنعتبر منطقة بعيدة تمامًا عن حواف المستوى . ونستطيع أيضًا أن نميز الشحنة على المستوى على أن لها كثافة سطحية منتظمة وسنرمز للكثافة السطحية للشحنات بالرمز σ (وهو حرف إغريقي ينطق « سيجما ») وتقاس بوحدات كولوم لكل متر مربع .

وسنعتبر - مرة أخرى - أن المركبات المستعرضة للقوة المؤثرة عل شحنة اختبار موجبة عند مسافة x من المستوى يلاشي بعضها بعضًا . فبالنسبة لكل مساحة صغيرة من الشحنة فوق أو إلى يمين q_t ستكون هناك شحنة مساوية تحت أو إلى اليسار بحيث تلغي كل المركبات ما عدا مركبة القوة العمودية المتجهة بعيدًا عن أو في اتجاه المستوى . كما أن كل النقط الواقعة عند نفس المسافة من المستوى اللانهائي ستكون متكافئة والسطح الجاوسي المناسب في هذه الحالة من التماثل يوضحه الشكل 24–16 وهو بمثابة أسطوانة مساحة قطعها المستعرض A ومحورها متعامد معع المستوى المشحون . وسنقوم الآن بعرض الملاحظات التالية :

1 المجال **E** ليست له مركبات متعامدة مع الجوانب الأسطوانية لهذا السطح ، ولهذا فإن $\Sigma E_{\perp}\Delta A = 0$ لهذا الجزء من السطح .

2 المجال **E** متعامد تمامًا مع غطائي طرفي السطح الأسطواني وله قيمة ثابتة عبر هذه المساحات ، ولذا تكون لغطائي الطرفين $\Sigma(E_{\perp}\Delta A) = 2\,(EA)$.

3 تكون الشحنة المحصورة داخل السطح الجاوسي هي σA ويقدم لنا قانون جاوس النتيجة التالية للمجال الكهربي الناشئ عن مستوى منتظم من الشحنة :

$$E = \frac{\sigma}{2\,\epsilon_0} \qquad (16\text{–}8)$$

لاحظ أن هذه النتيجة لا تعتمد على موقع x !

ولابد أن تكون مدركًا لمدى صعوبة الحصول على هذه النتائج عند تطبيق قانون كولوم مباشرة ؛ بينما نتائج قانون جاوس بسيطة ومباشرة عند الاستخدام .

مثال 16-6 :

يلاحظ حدوث شرارة كهربية خلال الهواء عندما تزيد شدة المجال الكهربى عن نحو 3×10^6 N/C . (ويسمى هذا المقدار **الشدة الكهربية** للهواء) . ما مقدار الشحنة بالتقريب والتى يمكن أن تحملها كرة معدنية قطرها 10.0 cm قبل حدوث شرارة كهربية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : بالنسبة لكرة مشحونة بانتظام ، ما هو التعبير الرياضى للمجال الكهربى عند سطح الكرة ؟

الإجابة : توضح المعادلة 16-6 (أ) أن $E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$ طالما كانت $r \geqslant R$ ولهذا يمكنك استخدام هذا التعبير عند $r = R$.

سؤال : ما هو شرط الحصول على أقصى شحنة قبل حدوث الشرارة ؟

الإجابة : عليك وضع $r = R$ ، ثم استعمل القيمة القصوى لشدة المجال الكهربى $E_{max} = 3 \times 10^6$ N/C ، وهو ما يناظر أقصى شحنة .

الحل والمناقشة : باستخدام البيانات العددية المعطاة ، نحصل على :

$$3 \times 10^6 \text{ N/C} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)\,\frac{Q}{(0.050\text{ m})^2}$$

أى أن كرة بهذا الحجم تستطيع حمل نحو 1 μC من الشحنة .

تمرين : ما هى شدة المجال الكهربى على بعد 75 cm من مركز الكرة عندما تكون شحنتها 0.5 μC ؟ **الإجابة** : 8000 N/C .

مثال 16-7 :

يوضح الشكل 16-25 صفيحتين كبيرتين (لا نهائيتين) من الشحنة ، تواجه إحداهما الأخرى . وللصفيحتين نفس الكثافة السطحية للشحنة المتضادة $+\sigma$ و $-\sigma$. أوجد التعبير الرياضى للمجال الكهربى **E** الناشئ عن هذه الشحنات فى ثلاثة مواقع : بين اللوحين ، إلى يمين اللوح الأيمن ، وإلى يسار اللوح الأيسر .

استدلال منطقى :

سؤال : هل استخدم قانون جاوس فى هذه الحسابات ؟

الإجابة : حيث أننا قد استخدمناه بالفعل بالنسبة لصفيحة منفردة من الشحنة فإنك تستطيع استخدام نفس النتيجة وكذا مبدأ التراكب .

سؤال : ما هى مقتضيات مبدأ التراكب ؟

الإجابة : إنه يقتضى أنك تستطيع اختيار أية نقطة تريدها ثم تجمع إسهامات كل صفيحة فى قيمة المجال عند تلك النقطة كما لو كانت الصفيحة الأخرى غير موجودة .

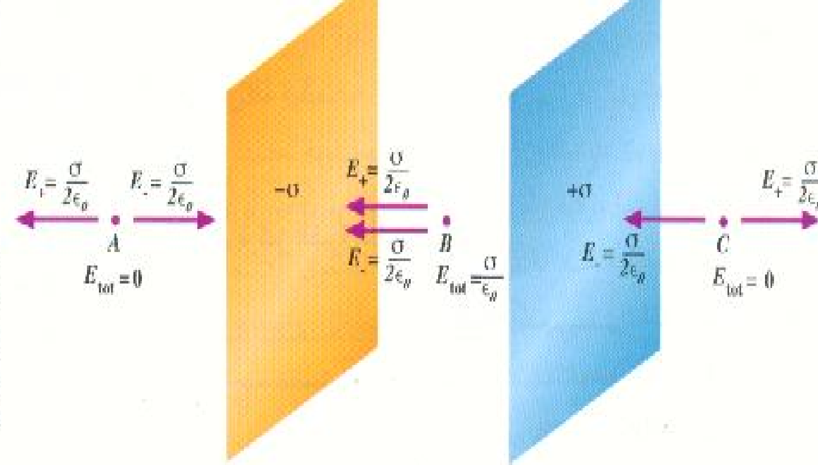
سؤال : ما هى الإسهامات المنفردة فى المجال **E** ؟

الإجابة : المعادلة 16-8 تعطينا $E = \sigma/2\epsilon_0$ عند **أية نقطة تختارها** وتكون اتجاهات المجالات نحو الشحنات السالبة وبعيدًا عن الشحنات الموجبة ، كما هو الحال دائما .

الحل والمناقشة : عند أية نقطة ، تسهم الصفيحتان بشكل متساوٍ فى مقدار E . وكما هو واضح فى الشكل 16-25 ، فإن الإسهامات متضادة فى الاتجاه ويلغى أحدها الآخر فى كل النقط إلى يمين وإلى يسار الصفيحتين معًا كما فى النقطتين A و C . أما فى أية نقطة مثل B تقع بين الصفيحتين فإن الإسهامين يكونان فى نفس الاتجاه . ولهذا يكون لدينا :

$$E = \begin{cases} 0 & \text{عند كل النقط التى ليست بين الصفيحتين} \\ 2\left(\dfrac{\sigma}{2\epsilon_0}\right) = \dfrac{\sigma}{\epsilon_0} & \text{عند كل النقط بين الصفيحتين} \end{cases}$$

ويكون اتجاه **E** بين الصفيحتين من الصفيحة الموجبة نحو السالبة .



شكل 16-25 : لوحان مشحونان بشحنات متضادة . وعندما تكون مساحاتهما أكبر بكثير من المسافة التى تفصلهما فإن E يكون مساويًا σ/ϵ_0 بينهما وصفرًا خارجهما .

شكل 16-26: تجذب الشحنة الموجبة الشحنات السالبة نحو سطح اللوح المعدنى . لماذا كانت خطوط المجال متعامدة مع اللوح عند سطحه ؟

لوح معدنى

16-13 الموصلات في مجالات كهربية

الإلكترونات كما رأينا فى القسم 4-16 حرة فى أن تتحرك خلال مادة ما موصلة استجابة للقوة الكهربية . افترض أن كرة صغيرة موجبة الشحنة موجودة فوق لوح معدنى كبير كما فى الشكل 26-16 . ستنجذب إلكترونات اللوح المعدنى بواسطة الشحنة الموجبة . وعلى الرغم من عدم تمكنها من مغادرة اللوح إلا أنها ستميل إلى الحركة نحو الشحنة الموجبة ولذا فإنها تتجمع عند سطح اللوح أقرب ما يكون من الكرة . ولو أن اللوح موصل بالأرض ، فإن الشحنة السالبة ستسرى من الأرض إلى داخل اللوح لتحل محل الإلكترونات التى دفعت إلى الحركة لتصبح أقرب ما يمكن من الكرة المشحونة . ولكن اللوح وهو فى الأصل متعادل ، سيكتسب الآن شحنة سالبة صافية مساوية عدديًا للشحنة الموجبة مما ينتج عنه نمط المجال الكهربى المبين فى الشكل 26-16 .

ويتم ترتيب الشحنات فوق اللوح بسرعة حيث تتهيأ الظروف حتى لا يحدث تحرك لمزيد من الشحنات داخل المعدن . ويسمى هذا الوضع **الظرف الكهروستاتيكى** ، ويقتضى بروز الحقيقة كبيرة الأهمية التالية :

فى الظروف الكهروستاتيكية لا يمكن للمجال الكهربى أن يوجد داخل الموصل .

ومن النتائج المهمة للمقولة السابقة أن :

فى الظروف الكهروستاتيكية يكون المجال الكهربى الخارجى متعامدًا مع سطح الموصل عند جميع النقط .

والبرهان على صحة هذه المقولة يكمن فى حقيقة أن مركبة **E** الموازية لسطح الموصل ستجعل الإلكترونات تتحرك بطول السطح ، ومرة أخرى ، حتى يتحقق ظرف استاتيكى (ساكن) . أما مركبة **E** العمودية فليست قوية بدرجة كافية (إلا فى الظروف القصوى) حتى تنتزع الإلكترونات خارج سطح المعدن .

لاحظ أنه طبقًا لهذه الملاحظات فإن خطوط المجال الكهربى فى الشكل 26-16 متعامدة على سطح اللوح ، كما أنها تنتهى عند السطح . كما أن عليك تذكر أن هذه القواعد تفترض حرية الإلكترونات فى الحركة ولهذا فهى لا تنطبق على العوازل .

مثال 16-8 :

يوضح الشكل 27-16 شحنة $+q$ معلقة عند مركز قشرة معدنية كروية مجوفة ونصف القطر الخارجى لهذه القشرة هو R_2 ونصف القطر الداخلى R_1 . استخدم قانون جاوس لتعيين شدة المجال الكهربى : (أ) بين الشحنة والسطح الداخلى للكرة (عند r_a) ، (ب) بين السطحين الداخلى والخارجى للكرة (r_b) و (جـ) خارج الكرة (r_c) . (د) إثبت أن شحنات مقدارها $-q$ و $+q$ تستحث على السطحين الداخلى والخارجى للكرة على التوالى .

شكل 27-16:
لو وضعت شحنة نقطية $+q$ عند مركز كرة مجوفة ، فإن شحنة $-q$ سوف تستحث على السطح الداخلى للكرة . ويمكن إيضاح ذلك عند اعتبار الأسطح الجاوسية الكروية داخل التجويف الكروى (r_a) ، وخارج الموصل (r_c) . وتتميز هذه الأسطح الجاوسية فى الشكل باللون الأخضر . تذكر أن المجال الكهربى لابد وأن يكون صفرًا فى كل بقعة داخل المادة الموصلة .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن الاستقرار على سطح جاوس الذى يجب استخدامه ؟

الإجابة : المسألة ذات تماثل كروى ولهذا لابد أن تكون الأسطح الجاوسية على هيئة كرات متمركزة حول $+q$. وأنصاف أقطار الأسطح الجاوسية التى عليك اختيارها فى كل من المناطق التى تود أن تحسب فيها قيمة المجال هى المميزة بالحروف r_a ، r_b ، r_c فى الشكل 27-16 .

سؤال : ما الذى تقدمه $\Sigma E_{\perp}\Delta A$ لى بالنسبة للأسطح الجاوسية هذه ؟

الإجابة : يمكنك استخدام اعتبارات التماثل الواردة فى القسم 12-16 . وبالنسبة للمناطق الثلاث ، تكون النتيجة هى :

$$\Sigma E_{\perp}\Delta A = E(4\pi r^2)$$

حيث يتجه E قطريًا .

سؤال : ما هى الشحنة الكلية المحاطة بكل سطح جاوسى ؟

الإجابة : هذا هو السؤال الإيضاحى بالنسبة لسطح جاوسى نصف قطره r_a فإن من الواضح $+q = Q_{\text{المحاطة}}$. وبالنسبة لسطح جاوسى نصف قطره r_c خارج الكرة ، فإننا نحصل على نفس النتيجة ، لأن الكرة نفسها لا تحتوى على شحنة صافية . أما فى داخل القشرة ، عند r_b ، فإننا لا نستطيع أن نجيب ببساطة بمجرد النظر .

سؤال : يقع السطح الجاوسى الذى نصف قطره r_b داخل الموصل . ما هى المعلومة التى يمكن استخلاصها من ذلك ؟

الإجابة : لابد أن يكون المجال فى تلك النطقة صفرًا ، لأننا نفترض موقفًا (أو ظرفًا) كهروستاتيكيا .

سؤال : ما الذى يمكن استخلاصه فيما يتعلق بالشحنة من هذه الحقيقة ؟

الإجابة : حيث أن E لابد وأن تكون صفرًا فى جميع نقط الموصل فإن قانون جاوس يتطلب أن تكون $Q_{\text{المحاطة}} = 0$ بالنسبة لأى سطح جاوسى فيما بين R_1 و R_2 وحتى نصل إلى $r = R_1$. ولكى تكون $Q_{\text{المحاطة}} = 0$ فلابد أن تستقر شحنة سالبة فى مكان ما

داخل السطح الجاوسى حتى تلغى أثر $+q$ الموجودة عند مركز الكرة . وبتقليص نصف قطر السطح الجاوسى إلى $r = R$ فيمكننا إلغاء إمكانية وجود شحنة سالبة صافية مستقرة فى مكان ما فى باطن الموصل ، واستنتاج أن **الشحنة $-q$ تقع على السطح الداخلى للموصل** .

سؤال : وإلى ماذا يشير هذا بالنسبة للشحنة على السطح الخارجى ؟

الإجابة : بما أن الكرة متعادلة ولا تحمل شحنة صافية ، فإن $+q$ لابد وأن تستقر على السطح الخارجى ، ويتفق هذا مع نتائج قانون جاوس بالنسبة للمنطقة الواقعة خارج الكرة .

الحل والمناقشة : سنلخص فيما يلى قيم المجال الكهربى

$$E = \begin{cases} \dfrac{kq}{r^2} & r < R_1 \\ 0 & R_1 \leqslant r \leqslant R_2 \\ \dfrac{kq}{r^2} & r \geqslant R_2 \end{cases}$$

إن شحنة مقدارها $-q$ ستُحث على الحركة نحو السطح الداخلى للكرة المعدنية ، بينما تتحرك شحنة $+q$ على السطح الخارجى . وفى حالة التماثل هذه تتوزع الشحنات السطحية بانتظام على سطحى الكرة . هل تستطيع أن تفكر مليًا فى أن نفس الشحنات قد تستحث بغض النظر عن شكل الموصل المجوف ؟ (فى حالة أى شكل اعتباطى ، فإنها لن تظل موزعة بانتظام) .

16-14 الألواح المعدنية المتوازية

يعتبر المجال الكهربى بين لوحين معدنيين مشحونين بشحنتين متضادتين ذا أهمية خاصة فى دراسة الكهربية ، كما سيتضح لنا كلما تقدمنا فى دراستنا . ونوضح بالشكل 16-28 (أ) موقفًا نموذجيًا . إن الشحنات التى على اللوحين مصدرها بطارية (كالتى سنتعرض لها فى الفصل القادم) وتعطى البطارية أحد اللوحين شحنة موجبة وتعطى الآخر شحنة سالبة كما هو واضح من الرسم التخطيطى فى الشكل 16-28 (ب) . وبما أن الشحنات تتجاذب إلى بعضها البعض ، لذا فإنها تستقر - أكبر ما يمكن - على الأسطح الداخلية للوحين (لاحظ أن الرمز $\overset{+}{}\!\!-\!\!|\!|\!\!-\!\!\overset{-}{}$ هو ما يشيع استعماله للدلالة على البطارية) .

لقد حسبنا المجال الكهربى المرتبط بهذا التشكيل للشحنات فى المثال 16-7 . وفيما عدا تلك المناطق بالقرب من حواف اللوحين ، فإن المجال يكون منتظمًا وثابتًا :

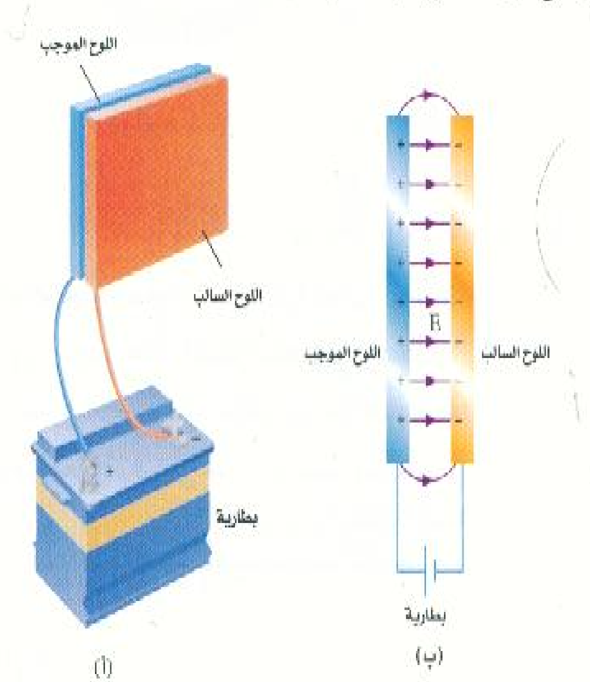
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

حيث σ هى الشحنة المنتظمة لوحدة المساحات على اللوحين .

ولنتذكر الآن من المعادلة 16-3 أن القوة المؤثرة على الشحنة q الموضوعة فى مجال كهربى $\mathbf{E}$ هى

$$F = qE$$

وبما أن E ثابت ، فإن القوة المؤثرة على أية شحنة بين اللوحين ستكون هى الأخرى ثابتة . وهكذا فإن اللوحين المشحونين المتوازيين يعتبران وسيلة مناسبة لإنشاء قوى ثابتة تؤثر على الشحنات . على أن هذا ليس صحيحًا بالنسبة لأى من توزيعات الشحنة الأخرى التى تناولناها . ونتيجة لهذا فإن الشحنات الحرة الواقعة بين لوحين مشحونين متوازيين ستتأثر بعجلة ثابتة طبقًا لقانون نيوتن الثانى ، $a = F/m$. وبالنسبة للشحنات الموجبة فإن القوة تكون بامتداد اتجاه المجال ، أما بالنسبة للشحنات السالبة فالقوة فى اتجاه عكس اتجاه المجال .



شكل 16-28:
تقوم البطارية بوضع شحنات متساوية ومتضادة فى الإشارة على اللوحين المعدنيين .

مثال 16-9 :

لوحان متوازيان معدنيان تفصلهما مسافة 3 mm ويحملان كثافتى شحنة متساويتين ومتضادتين ، هما $\pm 2\,\mu\,C/m^2$. وقد أطلق بروتون ($q = e$ و $m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) من حالة السكون عند اللوح الموجب . ما هى سرعة البروتون قبل أن يصطدم باللوح السالب مباشرة ؟ اعتبر الحيز بين اللوحين فراغًا .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى سيحدد السرعة المكتسبة ؟

الإجابة : إنها معادلات الحركة بالنسبة لعجلة ثابتة ، والتى تشتق من قانون نيوتن الثانى ، وعلى وجه التحديد ، المعادلة التى تربط بين تغير السرعة مع المسافة المقطوعة : $v^2 = v_0^2 + 2ax$. وقد عرفنا أن $v_0 = 0$ ، ونود إيجاد v عندما تكون $x = 3$ mm .

سؤال : من أين نحصل على قيمة العجلة ؟

الإجابة : كما هو الحال دائمًا فإن $a = F_{net}/m$ وقيمة m معطاة .

سؤال : وما الذى يحدد قيمة القوة الصافية F_{net} المؤثرة على البروتون ؟

الإجابة : إن القوة الوحيدة بالمسألة هى القوة الكهربية التى ينشؤها المجال بين اللوحين $F = qE$ ، و $q = e$ فى هذه الحالة .

سؤال : ما هى قيمة شدة المجال E ؟

الإجابة : $E = \sigma/\epsilon_0$ ونعلم كلاً من σ و ϵ_0 .

الحل والمناقشة : لنحسب أولاً المجال :

$$E = \frac{2\times10^{-6}\,\mathrm{C/m^2}}{8.85\times10^{-12}\,\mathrm{C^2/N.m^2}}$$

$$= 2.26 \times 10^5\ \mathrm{N/C}$$

(تأكد من استطاعتك اشتقاق الوحدات التى فى الإجابة) . ثم احسب القوة المؤثرة على البروتون :

$$F = eE = (1.6\times10^{-19}\ \mathrm{C})(2.26\times10^5\ \mathrm{N/C}) = 3.62\times10^{-14}\ \mathrm{N}$$

ثم أوجد العجلة (التسارع)

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3.62\times10^{-14}\ \mathrm{N}}{1.76\times10^{-27}\ \mathrm{kg}}$$

$$= 2.17\times10^{13}\ \mathrm{m/s^2}$$

ثم عين السرعة النهائية :

$$v = (2ax)^{1/2} = [\,2(2.17\times10^{13}\ \mathrm{m/s^2})\,(0.003\ \mathrm{m})]^{1/2}$$

$$= 3.61\times10^5\ \mathrm{m/s}$$

لاحظ أنه على الرغم من أن الشحنة والقوة المؤثرة صغيرتان للغاية إلا أن الكتلة الضئيلة للبروتون تسمح له باكتساب سرعة كبيرة جداً .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادراً على :

1 تعريف (أ) الموصل ، (ب) العازل ، (جـ) الإلكترون الحر ، (د) الأرض الكهربية ، (هـ) الشحنة المستحثة ، (و) قانون كولوم ؛ (ز) خطوط المجال الكهربى ، (ح) شدة المجال الكهربى .

2 أن تعرف مقدار وإشارة الشحنة على كل من الإلكترون والبروتون .

3 أن تصف بطريقة كمية ، كيف تقوم الشحنات داخل جسم معدنى بإعادة توزيع نفسها عندما يقترب جسم مشحون ، وأن تشرح كيف يمكن شحن جسم بالتوصيل وبالحث .

4 أن تذكر النتائج المستخلصة من تجربة دلو الثلج لفاراداى .

5 أن تستخدم قانون كولوم فى إيجاد القوة المؤثرة على شحنة نتيجة وجود شحنات نقطية قريبة .

6 أن تحسب شدة المجال الكهربى عند نقطة لوجود عدة شحنات نقطية محددة .

7 أن تخطط خطوط المجال الكهربى بالقرب من أجسام مشحونة بسيطة .

8 أن تذكر قانون جاوس بالكلمات وبالتعبير الرياضى ، ثم تطبقه على توزيعات للشحنة ذات تماثل بسيط .

9 أن تحسب شدة المجال الكهربى عند أية نقطة نتيجة لتوزيع كروى أو خطى أو استوائى للشحنة .

10 أن تحدد ما يأتى تحت ظروف كهروستاتيكية : (أ) المجال الكهربى داخل معدن (فلز) ، (ب) أصل خطوط المجال الكهربى ، (جـ) نقط انتهاء خطوط المجال ، (د) الزاوية التى تسقط بها خطوط المجال على الأسطح المعدنية .

11 أن تستعمل العلاقة $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ فى مواقف بسيطة .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

كميات الشحنات الكهربية

وحدات SI للشحنة : الكولوم (C)

شحنة البروتون (e) : $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C

شحنة الإلكترون $(-e)$: -1.6×10^{-19} C

ثابت قوة كولوم (k)

$$k = 8.99 \times 10^{9}\ \mathrm{N.m^2/C^2}$$

سماحية الفراغ ϵ_0

$$\epsilon_0 = \frac{k}{4\pi} = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N.m^2}$$

وحدات المجال الكهربى

$$E = \frac{F}{q} = \mathrm{N/C.}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

مفاهيم الشحنة الكهربية

1 يوجد نوعان من الشحنة الكهربية ، موجب (+) وسالب (-) .

2 تحتوى الذرات على جسيمات أساسية مشحونة . البروتون يحمل كمية محددة من الشحنة الموجبة والإلكترون يحمل كمية محددة من الشحنة السالبة .

3 القوة بين الشحنات ذات الإشارة الواحدة تنافرية ، والقوى بين الشحنات ذات الإشارة المختلفة تجاذبية .

بقاء الشحنة

لا يمكن خلق أو تدمير شحنة موجبة أو سالبة صافية فى أية عملية فيزيائية .

قانون كولوم

يعطى مقدار القوة الكهربية بين شحنتين نقطيتين q_1 و q_2 تفصلهما مسافة r بالعلاقة

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

حيث k ثابت فيزيائى كونى يعرف بثابت قوة كولوم .

خلاصة :

1 تكون القوة الكهربية تجاذبية لو كان للشحنات إشارات متضادة ، وتنافرية لو كان للشحنات نفس الإشارة .

2 لو كان للشحنات تماثل كروى فإن المسافة r هى التى بين مراكزها .

المجال الكهربى (E)

يعرف المجال الكهربى فى نقطة ما من الفضاء بأنه النسبة بين القوة الكهربية المؤثرة على شحنة اختبار صغيرة q_t موضوعة فى تلك النقطة ومقدار تلك الشحنة :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}\,(\text{المؤثرة على } q_t)}{q_t}$$

خلاصة :

1 يكون اتجاه $\mathbf{E}$ هو نفس اتجاه القوة $\mathbf{F}$ المؤثرة على شحنة موجبة .

2 وحدات SI للمجال E هو N/C .

3 من نتائج تعريف $\mathbf{E}$ أن القوة المؤثرة على شحنة q ، موضوعة فى نقطة بها مجال كهربى $\mathbf{E}$ هى :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

المجال الكهربى لشحنة نقطية

مقدار المجال الكهربى لشحنة نقطية Q عند مسافة r من Q هو

$$E = \frac{kQ}{r^2}$$

خلاصة :

1 يكون اتجاه المجال الكهربى قطريًا إلى الخارج من شحنة موجبة وقطريًا إلى الداخل نحو شحنة سالبة .

2 يمكن حساب المجال الكهربى لعدد من الشحنات النقطية ـ من حيث المبدأ ـ فى أية نقطة بتطبيق مبدأ التراكب ، أى بحساب المجال الناشئ عن كل شحنة نقطية على حدة ثم جمع الإسهامات المنفردة **متجهيًا** .

3 داخل خريطة للمجال الكهربى تكون شدة المجال الكهربى أكبر ما يمكن حيث تكون الخطوط أكثف ما يمكن وأقل ما يمكن عندما تكون الخطوط أبعد ما تكون عن بعضها البعض .

التدفق (الفيض) الكهربى

التدفق الكهربى خلال عنصر صغير للمساحة ΔA هو :

$$\text{التدفق الكهربى} = (E\cos\theta)\Delta A = E_{\perp}\Delta A$$

حيث : شدة المجال الكهربى المار خلال $E = \Delta A$ ، الزاوية المحصورة بين $\mathbf{E}$ والعمودى على ΔA ، $\theta = \mathbf{n}$.

قانون جاوس

يكون مجموع إسهامات التدفق $E_{\perp}\Delta A$ فوق سطح مغلق بأكمله ـ يسمى سطحًا جاوسيًا ـ مساويًا للشحنة الكلية المحاطة بذلك السطح مقسومة على ϵ_0 . وقانون جاوس مفيد بشكل خاص للحالات التى يكون لتوزيع الشحنات فيها تماثل بسيط .

المجالات الكهربية ذات التماثل البسيط

شحنة كروية منتظمة Q (نصف قطرها R)

$$E = \frac{kQ}{r^2} \qquad r > R$$

قشرة كروية ذات شحنة مقدارها Q (ونصف قطرها R)

$$E = \begin{cases} 0 & r > R \\ \dfrac{kQ}{r^2} & r \gg R \end{cases}$$

شحنة خطية منتظمة

حيث λ = الشحنة لوحدة الأطوال (C/m) $\qquad E = \dfrac{2k\lambda}{r}$

صفيحة مستوية منتظمة الشحنة

حيث σ = الشحنة لوحدة المساحات (C/m^2) $\quad E = \dfrac{\sigma}{2\epsilon_0}$

الحيز بين لوحين مستويين متوازيين $\qquad E = \dfrac{\sigma}{\epsilon_0}$

واللوحان هنا يحملان كثافتي شحنة σ متساويتين ومتضادتين فى الإشارة .

الموصلات فى مجال كهربى

فى ظروف كهروستاتيكية فإنه :

1 لا يمكن للمجال الكهربى أن يتواجد داخل مادة موصلة .

2 لابد أن تكون خطوط المجال الكهربى الخارجى متعامدة فى كل نقطة مع سطح الموصل .

أسئلة وتخمينات

1 علقت كرة مشحونة صغيرة بخيط . كيف تحكم على ما إذا كانت الشحنة على الكرة موجبة أو سالبة ؟

2 تستطيع أن تضع شحنة استاتيكية (ساكنة) على أية قطعة جافة من البلاستيك إذا دلكتها بقطعة من النسيج أو الفراء أو أكياس التغليف البلاستيكية . كيف تستطيع تحديد إشارة الشحنة الموضوعة على البلاستيك ؟

3 الكهربية الأستاتيكية تحدث شرارة قد تسبب انفجار بعض الغازات الطيارة ، مما كان يمثل خطرًا حقيقيًا فى غرف العمليات بالمستشفيات لأن المخدر الذى كان يستعمل عندئذ كان قابلاً للاحتراق . ما هى الإجراءات التى يمكن اتخاذها للحد من هذا الخطر ؟

4 تبلغ الشدة الكهربية للهواء نحو 3×10^6 N/C . أى أن شرارة سوف تقفز خلال الهواء إذا زادت شدة المجال الكهربى عن هذه القيمة . لماذا تقفز الشرارة بشكل أفضل عند الأطراف والحواف الحادة ؟ عندما يصبح جسدك مشحونًا بشدة عند سيرك فوق سجادة عميقة الوبر فى جو جاف ، لماذا تقفز شرارة من أظافر يدك إلى أى جسم معدنى تلمسه مثل الموقد أو مقبض الباب ؟

5 تلتصق الملابس دائمًا عند إخراجها من المجفف . لماذا ؟ وما هو المتبع عادة لإزالة هذا التأثير ؟

6 لا تحاول أبدًا مسح الأتربة من سطح أسطوانة فونوغراف بقطعة قماش قطنية أو صوفية عادية . لماذا ؟

7 فى الأجواء الجافة كثيرًا ما يرى الإنسان (أو يسمع) شرارات تقفز عند تمشيط الشعر أو خلع الملابس فى الظلام . لماذا ؟

8 شحنتان نقطيتان موجبتان لهما نفس القدار تفصلهما مسافة D . أين يمكنك وضع شحنة ثالثة بحيث تكون محصلة القوة المؤثرة عليها صفرًا ؟ وهل تكون الشحنة عندئذ فى وضع اتزان مستقر ؟

9 شحنة نقطية موجبة وشحنة نقطية سالبة أكبر منها بكثير وتفصلهما مسافة D . هل هناك موضع يمكن أن توضع فيه شحنة نقطية ثالثة بحيث تكون محصلة القوة المؤثرة عليها صفرًا ؟

10 علقت كرة ضئيلة ذات شحنة q بين لوحين معدنيين متوازيين وكبيرين ومتصلين بالأرض . ارسم تخطيطيًا المجال الكهربى بين اللوحين . ما الذى تستنتجه فيما يخص الشحنات المستحثة على اللوحين ؟

11 إن خطوط المجال الكهربى المرسومة بشكل صحيح لن تتقاطع مطلقًا . لماذا ؟

12 تتم عادة حماية الأجهزة الحساسة ضد المجالات الكهربية غير المرغوب فيها وذلك بوضعها داخل علب معدنية أو داخل شبكة من الأسلاك الدقيقة المتصلة بالأرض . اشرح السبب فى أن مجال شحنة موضوعة خارج مثل هذه الدروع لا تؤثر فى المنطقة الداخلية .

مسائل

الأقسام من 16-1 إلى 16-8

1 احسب الشحنة الصافية على عينة من مادة مؤلفة من (أ) 8×10^{15} إلكترونًا و (ب) مجموعة من 8×10^{15} إلكترونًا و 6×10^{14} بروتونًا .

2 شحنتان نقطيتان $q_1 = -4.0\ \mu C$ و $q_2 = +3.0\ \mu C$ وتفصلهما مسافة 100 cm . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية على كل منهما .

3 قرب بروتونان من بعضهما إلى مسافة 3.5×10^{-14} m . (أ) أوجد القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على كل منهما . (ب) ما هى النسبة بين مقدار هذه القوة ووزن البروتون فوق الكرة الأرضية ؟ يمكنك اعتبار البروتون شحنة نقطية كتلتها 1.67×10^{-27} kg .

4 كم يمكن أن تبلغ كتلة البروتون لو أن مقدارى القوى الجاذبية والكهروستاتيكية كانا متساويين بين زوج من البروتونات ؟

5 وضعت شحنتان نقطيتان على محور x بحيث : أن الشحنة $+6.0\ \mu C$ عند $x = 0$ والشحنة $+8.0\ \mu C$ عند $x = +30$ cm . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنة $+6.0\ \mu C$.

6 وضعت شحنة نقطية مقدارها $+2.0\ \mu C$ على محور x عند $x = 25$ cm وشحنة مجهولة q عند $x = 65$ cm على نفس المحور ، وكانت القوة المؤثرة على الشحنة $2.0\ \mu C$ هى 1.2 N فى الاتجاه الموجب لمحور x . ما هو مقدار وإشارة الشحنة q ؟

■ 7 شحنتان نقطيتان q_1 و q_2 موضوعتان على بعد 60 cm من بعضهما البعض ، وتتنافران بقوة مقدارها 0.3 N . والمجموع الجبرى للشحنتين هو $+7.2\ \mu C$. أوجد كلا من q_1 و q_2 .

■ 8 كرر المسألة السابقة لو أن الشحنتين تتجاذبان بقوة مقدارها 0.3 N .

9 تتنافر شحنتان نقطيتان متساويتان فى المقدار بقوة مقدارها 2.4 N عندما تفصل بينهما مسافة 6.0 cm . أوجد مقدار كل منهما .

■ 10 كرتان متشابهتان كتلة كل منهما 240 g وقطر كل منهما 2.0 cm تفصلهما مسافة 6.0 cm (بين مركزيهما) . وتحمل كل منهما شحنة منتظمة مقدارها $70\ \mu C$. وقد أطلقت إحدى الكرتين . أوجد العجلة التى تتحرك بها الكرة . يمكنك إهمال الجاذبية .

■ 11 كرتان متماثلتان على هيئة نقطية وكتلة كل منهما 60 g وتفصل بينهما مسافة 240 cm ، وتحملان شحنات متشابهة q من حيث المقدار ومختلفة فى الإشارة . ما مقدار الشحنة q التى من شأنها جعل قوى التجاذب الكهروستاتيكية والتجاذب التثاقلى متساوية ؟

12 وضعت الشحنات النقطية الثلاث التالية على المحور x : $+5.0\ \mu C$ عند $x = 0$ ، $+4.0\ \mu C$ عند $x = -40$ cm و $+6.0\ \mu C$ عند 80 cm . أوجد القوة المؤثرة على (أ) الشحنة $6.0\ \mu C$ ، (ب) الشحنة $4.0\ \mu C$.

13 وضعت الشحنات النقطية الثلاث $-6\ \mu C$ و $+5\ \mu C$ و $-5\ \mu C$ عند $x = 0$ ، $x = -60$ ، $x = +60$ cm على الترتيب . أوجد القوة المؤثرة على (أ) الشحنة $-6\ \mu C$ و (ب) الشحنة $+5\ \mu C$.

14 شحنة مقدارها $6\,\mu C$ تفصلهما عن شحنة مقدارها $-3\,\mu C$ مسافة 60 cm . أوجد الوضع الذى يجب أن توضع فيه شحنة ثالثة $12\,\mu C$ بحيث تكون القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة عليها صفرًا .

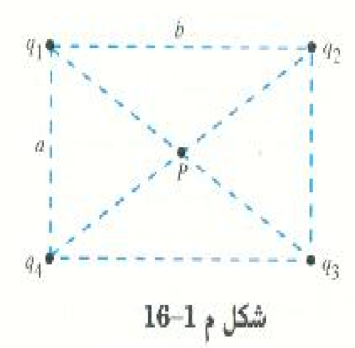
15 وضعت شحنتان نقطيتان على المحور x بحيث : الشحنة -5×10^{-9} C عند $x=0$ ، والشحنة $+6\times10^{-9}$ C عند $x = 100$ cm . عند أى موقع (مواقع) بالقرب من هذه الشحنات يمكن وضع شحنة $+4\times10^{-9}$ C بحيث لا تقع تحت تأثير أية قوة صافية ؟

16 وضعت شحنتان نقطيتان $+5\,\mu C$ و $+7\,\mu C$ على المحور x عند $x=0$ و $x = 120$ cm على الترتيب . عند أى موقع (مواقع) بالقرب من هذه الشحنات تكون القوة الكهروستاتيكية الصافية على الشحنة $-8\mu C$ صفرًا ؟

17 وضعت ثلاث شحنات نقطية متماثلة مقدار كل منها $+6\,\mu C$ عند الأركان الثلاثة لمربع طول ضلعه 8 cm . ما هى محصلة القوة الكهروستاتيكية التى تؤثر على شحنة مقدارها $+5\,\mu C$ موضوعة عن الركن الرابع للمربع ؟

18 وضعت ثلاث شحنات نقطية هى $+5.0$ ، $+6.0$ ، $+4.0\,\mu C$ عند ثلاثة أركان لمربع طول ضلعه 8 cm . أوجد القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على شحنة مقدارها $-8.0\,\mu C$ موضوعة عند الركن الرابع للمربع بحيث تواجه الشحنة $+6\,\mu C$ قطريًا .

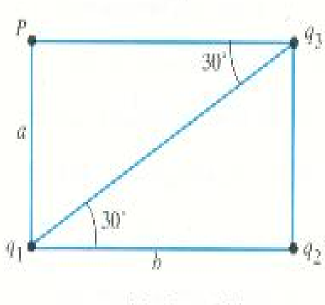
19 وضعت ثلاث شحنات متساوية مقدار كل منها $+5\,\mu C$ عند الأركان الثلاثة لمثلث متساوى الأضلاع ، وطول كل ضلع منه 10.0 cm . أوجد القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على كل شحنة .



شكل م 1–16

20 الشحنات النقطية الأربع المبينة فى الشكل م 1–16 قيمة كل منها $4.0\,\mu C$. أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على q_2 من جانب الشحنات الثلاث الأخرى ($b = 60$ cm و $a = 40$ cm) .

21 فى الشكل م 1–16 كانت $q_1 = q_3 = +5\,\mu C$ وكانت $q_2 = q_4 = -6.0\,\mu C$. أوجد مقدار واتجاه محصلة القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على q_1 . اعتبر أن $a = 40$ cm و $b = 60$ cm .




شكل م 2–16

22 كل من الشحنات النقطية الثلاث فى الشكل م 2–16 هى $+6.0\,\mu C$. أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على q_3 من جانب الشحنتين الأخريين . اعتبر أن $a = 40$ cm .

23 فى الشكل م 2–16 كانت $q_1 = q_3 = +5.0\,\mu C$ و $q_2 = -7.0\,\mu C$. أوجد مقدار واتجاه القوة المؤثرة على q_1 . اعتبر $a = 3.0$ m .



شكل م 3–16

24 علقت كرتان من نفس النقطة كما هو موضح فى الشكل م 3–16 . وكانت كتلة كل منهما 1.0 g وتحمل شحنة q . وكان طول الخيط 40 cm . وتتزن الكرتان عند $\theta = 30°$. أوجد الشحنة q على كل كرة .

25 كرر المسألة السابقة لو أن الكرتين كانتا تحملان شحنات غير متساوية ، بحيث كانت الكرة التى إلى اليسار تحمل نصف ما تحمله اليمنى من شحنة .

26 تتأثر شحنتان كرويتان صغيرتان بقوة كهروستاتيكية عندما تفصلهما مسافة R . فإذا ضوعفت الشحنة على أحداهما وضوعفت ثلاث مرات على الثانية ثم خفضت المسافة بينهما إلى النصف ، فما هى النسبة بين القوة الكهروستاتيكية الجديدة إلى القوة التى كانت بينهما أصلاً ؟

الأقسام من 16-9 إلى 16-11

27 أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربى عند مسافة قدرها 1.0 m من إلكترون . أعد المسألة بالنسبة لبروتون .

28 أوجد شدة المجال الكهربى الناشئ عن شحنة نقطية $q = -6.0\,\mu C$ عند نقطة تبعد 90 cm عن الشحنة . هل يتجه المجال قطريًا إلى الخارج أم إلى الداخل ؟

29 وضعت شحنتان على المحور x : الشحنة $+5.0\,\mu C$ عند $x = 90$ cm والشحنة $-4.0\,\mu C$ عند $x = 0$. أوجد المجال **E** عند (أ) $x = 40$ cm و (ب) $x = -60$ cm .

30 (أ) أوجد المجال الكهربى عند نقطة تقع عند منتصف المسافة بين شحنتين هما $3.0\,\mu C$ و $6.0\,\mu C$ تفصلهما مسافة 60 cm . (ب) أعد المسألة عندما تكون الشحنة الثانية $-5.0\,\mu C$.

■ 31 أوجد المجال الكهربى **E** عند مركز المستطيل فى الشكل م 16-1 لو أن : (أ) $q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ و (ب) $q_1 = q_2 = -3.0\,\mu C$ و $q_3 = q_4 = 4.0\,\mu C$. اعتبر أن $a = 40$ cm و $b = 60$ cm .

■ 32 وضعت شحنتان $6.0\,\mu C$ و $-6.0\,\mu C$ عند رأسى مثلث متساوى الأضلاع . وطول ضلعه 10.0 cm . ما هو مقدار واتجاه المجال الكهربى عند الرأس الثالث للمثلث ؟

33 فى الشكل م 16-2 كانت $q_1 = q_3 = -5.0\,\mu C$ و $q_2 = 3.0\,\mu C$. أوجد المجال الكهربى **E** فى النقطة P . اعتبر $a = 40$ cm .

■ 34 وضعت شحنتان $3.0\,\mu C$. $-5.0\,\mu C$ على المحور x عند $x = 0$ و $x = 40$ cm على الترتيب . أين ـ على المحور x لو كان ممكنًا ـ يكون المجال الكهربى **E** صفرًا ؟

■ 35 تتأثر كرة صغيرة تحمل شحنة مقدارها -4.0×10^{-13} C بقوة نحو الشرق مقدارها 1.0×10^{-9} N بسبب شحنتها عندما تعلق من نقطة معينة فى الفضاء . ما هو مقدار واتجاه المجال الكهربى **E** فى تلك النقطة ؟

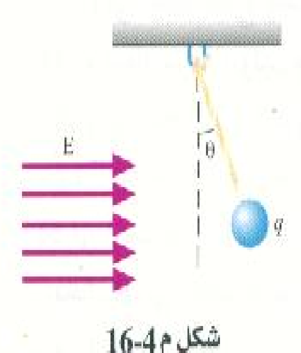
■ 36 يتجه المجال الكهربى فى منطقة معينة نحو الشرق وشدته 3600 N/C . أوجد مقدار واتجاه القوة الكهروستاتيكية التى تتأثر بها شحنة مقدارها $-6.0\,\mu C$ موضوعة فى هذه المنطقة .

■ 37 انطلق إلكترون فى منطقة يمتد المجال الكهربى بها فى اتجاه المحور x الموجب وشدته 3600 N/C . أوجد مقدار واتجاه عجلة (تسارع) الإلكترون . (كتلة الإلكترون $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) .

■ 38 تحمل قطرة صغيرة من الزيت كتلتها m شحنة $+q$. وعندما علقت فى مجال كهربى منتظم يتجه رأسيًا فإن القطرة أصبحت (طافية) فى الفضاء الحر . عبِّر عن مقدار المجال الكهربى **E** بدلالة الشحنة q والكتلة m للقطرة .

■ 39 ثبتت كرة صغيرة كتلتها 0.05 g فى الفضاء ضد الجاذبية الأرضية عندما كان المجال الكهربى المنتظم المؤثر عليها مقداره 600 N/C ويتجه رأسيًا إلى أسفل . أوجد الشحنة التى على الكرة .

■ 40 علقت كرة كتلتها 0.450 g بخيط فى مجال كهربى مقداره 6000 N/C ويتجه رأسيًا إلى أعلى . وكان الشد فى الخيط يساوى 3.0×10^{-3} N . أوجد شحنة الكرة .



شكل م 16-4

■ 41 فى الشكل م 16-4 علقت كرة كتلتها m وشحنتها q بخيط فى مجال كهربى **E** . وكانت الكرة معلقة بحيث يصنع الخيط زاوية مقدارها θ مع الخط الرأسى . أوجد **E** بدلالة m ، q ، θ .

■ 42 لو كانت كتلة الكرة فى المسألة السابقة هى 0.500 g وكان الخيط يصنع زاوية مقدارها 15° مع الرأسى عندما تعلق فى مجال كهربى شدته 500 N/C . ما هى الشحنة q التى على الكرة ؟

مسائل إضافية

■ 43 وضعت شحنتان نقطيتان على المحور x : شحنة $+6\,\mu C$ عند $x = 0$ وشحنة $+8\,\mu C$ عند مسافة $100\ cm$ أين على المحور x بين هاتين الشحنتين لابد من وضع شحنة ثالثة حتى تكون القوة الكهروستاتيكية الصافية المؤثرة على الشحنات الثلاث كلها صفرًا ؟ أوجد مقدار الشحنة الثالثة.

■ 44 وضعت شحنة مقدارها $-5.0\,\mu C$ عند نقطة أصل المحور x . ووضعت شحنتان أخريان على المحور x : q_1 عند $x = 40\ cm$ و q_2 عند $x = 50\ cm$. أوجد مقدار وإشارة كل من q_1 و q_2 إذا كانت القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على الشحنات الثلاث كلها صفرًا .

■■ 45 تؤثر شحنتان نقطيتان q_1 و q_2 تفصلهما مسافة $1.0\ m$ بقوة مقدارها $0.090\ N$ على إحداهما الأخرى . والمجموع الجبرى للشحنتين $q_1 + q_2 = 70\,\mu C$. أوجد مقدار كل من q_1 و q_2 . هل القوة تنافرية أم تجاذبية ؟

■ 46 يحتوى الشخص متوسط الحجم على نحو 3×10^{28} بروتونًا وعددٍ مماثل من الإلكترونات . افترض أن هناك شخصين تفصلهما مسافة قدرها $40\ m$ ، وأن 0.2 فى المائة من إلكترونات أحد الشخصين قد انتقلت إلى الشخص الآخر . ما هو مقدار القوة اللازمة للاحتفاظ بالشخصين على نفس البعد ؟

47 كرتان موصلتان صغيرتان ومتماثلتان تحملان الشحنتين $q_1 = 9.0\,\mu C$ و $q_2 = 5.0\,\mu C$. والمسافة بين مركزيهما هى $0.5\ m$. (أ) أوجد القوة الكهروستاتيكية بينهما . (ب) تلامست الكرتان ثم انفصلتا ثانية إلى نفس المسافة السابقة . ما هى القوة الكهروستاتيكية بينهما بعد حدوث الاتزان ؟

■ 48 فى نموذج بوهر لذرة الهيدروجين يدور إلكترون حول بروتون ساكن فى مدار نصف قطره $0.53 \times 10^{-10}\ m$. (أ) ما مقدار القوة الكهروستاتيكية التى يؤثر بها البروتون على الإلكترون الذى يدور حوله ؟ (ب) لو كانت هذه القوة ستعتبر قوة جذب مركزية لتحتفظ بالإلكترون فى مدار دائرى . فكم ستكون سرعة الإلكترون ؟ (كتلة الإلكترون $m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$) .

■ 49 فى المسألة السابقة ، أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربى الناشئ عن البروتون عند موقع الإلكترون .

■ 50 يعتبر نوى الراديوم مشعًا ويبعث بجسيمات ألفا $(q_\alpha = +2e$ ، $m_\alpha = 4 \times 1.66 \times 10^{-27}\ kg)$ والنواة التى ينبعث منها جسيم ألفا ستكون شحنتها $+86e$ وكتلتها كبيرة جدًا . أوجد : (أ) القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على جسيم ألفا من جانب النواة عندما تكون المسافة بينهما $6 \times 10^{-14}\ m$ و (ب) تسارع (عجلة) جسيم ألفا فى تلك اللحظة .

■ 51 تحمل قشرة كروية رقيقة عازلة نصف قطرها R شحنة مقدارها Q موزعة بانتظام على سطح القشرة . ما هو المجال الكهربى $\mathbf{E}$. عند مركز القشرة ؟

■■ 52 تحمل كرة معدنية معزولة ومجوفة نصف قطرها $40\ cm$ شحنة مقدارها $-10.0\,\mu C$. ما هو مقدار المجال الكهربى $\mathbf{E}$ (أ) فى الفضاء الفارغ داخل الكرة و (ب) على بعد $60\ cm$ من مركز الكرة ؟

■■ 53 تم إبطاء سرعة بروتون يتحرك على امتداد المحور x بواسطة مجال كهربى $\mathbf{E}$. وعند $x = 0$ كانت سرعة البروتون $3.5 \times 10^{6}\ m/s$ وعند $x = 7.0\ cm$ توقف البروتون تمامًا . أوجد مقدار واتجاه المجال $\mathbf{E}$. (كتلة البروتون $m_p = 1.67 \times 10^{-27}\ kg$) .

■■ 54 فى لحظة ما ، كان إلكترون يتحرك منطلقًا من نقطة الأصل بامتداد المحور x وبسرعة تبلغ $6.0 \times 10^{6}\ m/s$. ويتسبب مجال كهربى منتظم $\mathbf{E}$ مواز للمحور فى إبطاء حركة الإلكترون ، ثم توقفه ، ثم تحركه فى الاتجاه المعاكس حتى يصل فى النهاية إلى نقطة الأصل بعد زمن قدره $40.0\,\mu s$. أوجد مقدار واتجاه المجال الكهربى $\mathbf{E}$. (كتلة الإلكترون $m_e = 9.11 \times 10^{-31}\ kg$) .

■ 55 قذف إلكترون من نقطة أصل الإحداثيات باتجاه المحور x الموجب بسرعة v_{x0} . وهناك مجال كهربي E يتجه بامتداد المحور y في هذه المنطقة . (أ) إثبت أن الإحداثي y للإلكترون بعد فترة زمنية t هو $y = -eEt^2/2me$) حيث e هي شحنة الإلكترون و E مقدار المجال الكهربي . (ب) إثبت أن مسار الإلكترون في المستوى xy يعطى بالمعادلة $(y = eE/2m_e v_{x0}^2)(x^2)$.

■ 56 وضعت شحنتان لهما نفس المقدار $0.5\ \mu C$ وإشارات متضادة على المحور x ، ثم وصلتا معًا بواسطة قضيب (متعادل كهربيًا) ولا كتلة له ، وطوله 5.4×10^{-8} m . ثم طبق مجال كهربي منتظم شدته 400 N/C على امتداد المحور y . (أ) أوجد عزم الدوران الصافي المؤثر على الشحنتين . (ب) ما هو عزم الدوران لو كان المجال الكهربي متجهًا بزاوية مقدارها $60°$ مع المحور x ؟

■ 57 يحمل كل إلكترون في شعاع للجسيمات طاقة حركة مقدارها 1.2×10^{-16} J . ما هو مقدار المجال الكهربي اللازم لإيقاف الإلكترونات في الشعاع في مسافة طولها 15 cm ؟ وما هو اتجاه ذلك المجال ؟
(كتلة الإلكترون $me = 9.1 \times 10^{-31}$ kg) .

■ 58 وضعت شحنتان متساويتان في المقدار وبإشارتين متعاكستين على امتداد المحور x عند $x = b$ و $x = -b$. إثبت أن المجال الكهربي الناشئ عن هاتين الشحنتين عند نقطة على المحور y سيكون في اتجاه مواز لمحور x ومقدارها يعطى بالعلاقة $E = 2kqb/(y^2 + b^2)^{3/2}$.

■ 59 لو أن الشحنتين في المسالة السابقة كان لهما نفس الإشارة فماذا قد يكون اتجاه ومقدار المجال الكهربي ؟

■ 60 وضعت شحنتان نقطيتان q و $-q$ على المحور x بحيث كانتا قريبتين جدًا من بعضهما وعند مسافة صغيرة جدا b على جانبه نقطة أصل الإحداثيات . إثبت أن مقدار المجال الكهربي عند نقطة بعيدة على امتداد المحور x تعطى بالمعادلة $E = 4kqb/x^3$.

الفصل السابع عشر



الجهد الكهربى

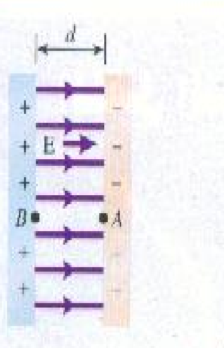
لقد وجدنا عند دراسة الميكانيكا أن مفهوم الكميات القياسية كالشغل والطاقة ذو فائدة عظيمة لأن كثيرًا من المواقف التى تظهر أثناء الدراسة ، تكون أعقد من أن تحل بالتفصيل باستخدام متجهات القوة . ويعتبر إدخال مفهوم الطاقات « القياسية » مما يتيح لنا غالبًا أن نحصل على نتائج نافعة بشكل سريع وبسيط . وسنرى فى هذا الفصل أن مفهوم طاقة الوضع الكهربية مفيد للغاية فى كثير من التطبيقات الكهربية . بل إنه لا غنى عنه لفهم موضوعات متنوعة مثل الدوائر الكهربائية ومعجلات الجسيمات الأولية .

17-1 طاقة الوضع الكهربية

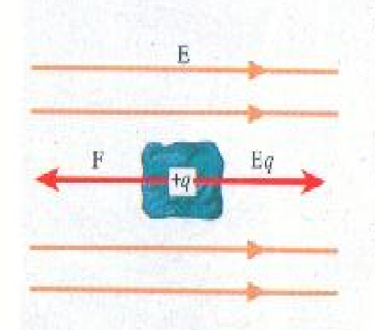
تذكر عند مناقشة حركة جسم من مكان إلى آخر فى مجال للجاذبية (تثاقلى) أننا استعملنا مفهوم طاقة الوضع التثاقلية (GPE) . فلكى نرفع جسمًا كتلته m بدلاً من استعمال قوة تتجه إلى أعلى مقدارها mg حتى تتوازن مع شد الجاذبية للجسم إلى أسفل . والشغل المبذول لرفع الجسم لمسافة مقدارها h هو عبارة عن حاصل ضرب القوة فى المسافة أو mgh . وهنا نقول أن هذا الشغل قد أدى إلى زيادة طاقة الوقع التثاقلية للجسم . فإذا ترك الجسم بعد ذلك ليسقط بحرية من نفس الارتفاع h فإنه سيكتسب طاقة حركة ، ومن قانون بقاء الطاقة نستطيع كتابة (GPE) طاقة الوضع التثاقلية عند ارتفاع مقداره h = (KE) طاقة الحركة المكتسبة خلال المسافة h .

وقد جنينا فائدة ضخمة من طاقة الوضع التثاقلية وتحويلها المتبادل مع طاقة الحركة أثناء دراستنا للميكانيكا .

وهناك موقف مماثل لهذا في الكهربية ؛ لأن الأجسام المشحونة عادة ما يكون لديها طاقة وضع كهربية يمكن تحويلها إلى طاقة حركة ، ولإيضاح ذلك لنعتبر حالة جسم مشحون موجود بين لوحين متوازيين ومشحونين (وسوف نهمل قوى الجاذبية في هذه المناقشة لأنها مهملة القيمة مقارنة بالقوى الكهربية التي نحن بصددها) . ويوضح الشكل 17-1 المجال الكهربى في المنطقة الوسطى بين اللوحين ؛ حيث تكون له قيمة ثابتة **E** ويتجه كما في الشكل . أما الشكل 17-2 فيبين القوى المؤثرة على جسم موجب الشحنة موجود بين اللوحين والجسم المشحون بشحنة q سيتأثر بقوة مقدارها $\mathbf{E}q$ بسبب وجود المجال الكهربى ويكون اتجاه هذه القوة نحو اليمين . وإذا أردنا أن نمسك بالجسم المشحون في مكانه فلا يتحرك فلابد أن نؤثر عليه بقوة مقدارها $\mathbf{F} = -\mathbf{E}q$.



شكل 17-1:
يكون المجال الكهربى بين لوحين متوازيين مشحونين بشحنات متضادة منتظمًا .



شكل 17-2:
تلزم قوة هى $\mathbf{F} = -\mathbf{E}q$ لو كان على الجسم الذى شحنته q أن يظل معلقًا بين اللوحين المرسومين فى الشكل 17-1 .

لنفترض أن الجسم المشحون (وهو أصغر بكثير مما هو مبين بالشكل) موجود أصلاً في النقطة A في الشكل 17-1 . فلو أردنا تحريكه إلى النقطة B للزم أن نجذبه في المسافة كلها بقوة مقدارها **F** . أى أننا سنبذل شغلاً على الجسم عند جذبنا له من A إلى B . وحيث أن **E** ثابت في هذا الموقف فإن الشغل الذى تبذله القوة **F** للانتقال من A إلى B هو :

$$W_{AB} = Fd = qEd \qquad (\text{ثابت } \mathbf{E})$$

وهذا الشغل مشابه تمامًا للشغل المبذول في رفع جسم ضد قوة الجاذبية الثابتة . ولهذا نقول أن الشغل المبذول في جذب الشحنة ضد القوة الكهربية يزيد من طاقة الوضع الكهربية للشحنة . وعلينا تذكر أنه في كلتا الحالتين ـ التثاقلية والكهربية ـ فإن الفرق في طاقة الجهد فقط هو المهم فيزيائيًا .

وبعد أن نصل بالجسم إلى النقط B يمكننا أن نطلقه ونستعيد طاقة وضعه على هيئة طاقة حركة . فالجسم المشحون وهو عند B سيجذب نحو النقطة A بالقوة $\mathbf{E}q$ (التى أصبحت الآن غير متوازنة) والتى تؤثر عليه وهكذا فعندما يطلق الجسم عند B فإنه يتسارع نحو A ؛ وهكذا نعرِّف طاقة الوضع الكهربية (EPE) لشحنة عند B بالنسبة لنقطة أخرى A إن طاقة الوضع الكهربية لشحنة عند النقطة B بالنسبة للنقطة A تساوى الشغل المبذول ضد القوى الكهربية لتحريك الشحنة من A إلى B .

$$W_{AB} = \Delta EPE = EPE_B - EPE_A$$

ويكمن الفرق الأساسى عند مقارنة طاقة الوضع الكهربية مع طاقة الوضع التثاقلية في حقيقة أن هناك نوعين من الشحنة . ولننظر الآن ماذا يمكن أن يحدث لو أن الشحنة الموجودة بين اللوحين كانت سالبة . إن القوة المؤثرة على الشحنة $-q$ ستتجه الآن في عكس اتجاه المجال **E** ، وعلى هذا فالقوة المؤثرة لابد وأن تبذل شغلاً موجبًا على $-q$ حتى تحركها من B إلى A ؛ أى أن الشحنة $-q$ كانت ستحوز على طاقة وضع كهربية أكبر عند A عما إذا كانت عند B . وإذا سمح لها أن تتحرك بحرية « لسقطت » من A نحو B في اتجاه عكس اتجاه **E** .

17-2 فرق الجهد

وفيما يخص الكهربية سوف نخطو خطوة أبعد مما فعلنا فى الميكانيكا وذلك بتعريف كمية قياسية أخرى سنطلق عليه **الجهد الكهربى** . ولكى نوضح هذا المفهوم سنعود إلى حالة الشحنة الموجبة التى تتحرك بين اللوحين المشحونين فى الشكل 1-17 . لقد كان الفرق فى **طاقة** الوضع لتلك الشحنة بين النقطتين A و B هو

$$\mathrm{PE}_B - \mathrm{PE}_A = qEd$$

دعنا الآن نقسم هذه المعادلة على q ، لنحصل بذلك على الفرق بدلالة كمية جديدة لا تعتمد سوى على E والمسافة بين A و B :

$$\frac{\mathrm{PE}_B - \mathrm{PE}_A}{q} = V_B - V_A \qquad (17\text{-}1)$$

وهذه الكمية الجديدة ، PE/q تسمى الجهد الكهربى ويرمز لها بالرمز V . وللجهد الكهربى وحدات جول لكل كولوم أو ما سنسميه **فولت** . ويلاحظ أنه خلافاً لطاقة الوضع PE ، فإن الجهد الكهربى لا يعتمد على الشحنة النوعية q التى يؤثر عليها المجال ؛ كما يلاحظ أيضًا أن تعريف الفولت يفتح الباب أمام تفسير بديل لوحدات المجال الكهربى E .

وهكذا فإنه بالإضافة إلى قياس المجال كقوة لوحدة الشحنات (N/C) فإنه يعتبر قياسًا لمدى السرعة التى يتغير بها الجهد الكهربى مع الموضع (لكل متر من المسافة) . والجهد يتضاءل فى اتجاه المجال الكهربى . أما فرق الجهد بين A و B فيشار إليه أيضًا **كفرق الفولطية** أو مجرد **الفولطية** أحيانًا ، وهى فى هذه الحالة :

$$V_{AB} = V_B - V_A = Ed \quad (\text{المجال } \mathbf{E} \text{ ثابت}) \qquad (17\text{-}2)$$

دعنا الآن نعيد صياغة تعريف فرق الجهد :

فرق الجهد (أو الفولطية) بين النقطتين A و B هو الفرق فى طاقة الوضع لشحنة موجبة بين نقطتين ، مقسومًا على الشحنة .

من المهم عند هذا الحد ملاحظة (وتذكر) ما يلى :

1 أن المعادلة 2-17 تنطبق فقط على حالة مجال ثابت كذلك الذى ينشؤه لوحان متوازيان مشحونان .

2 يُعرَّف الجهد الكهربى بدلالة طاقة الوضع الكهربية (EPE) لشحنة **موجبة** بمعنى أنه عند التحرك من جهد عالٍ إلى آخر منخفض فإن الشحنة الموجبة تفقد EPE أما الشحنة السالبة فتكون EPE لها أقل عند نقطة ذات جهد أعلى ، أى أنها تكتسب EPE عندما تتحرك من الجهد العالى إلى الجهد المنخفض .

وهذه النقطة الأخيرة يمكن تأكيدها إذا استعرنا بعض مصطلحات الجاذبية (التثاقل) . عندما نتحدث عن الجهد الكهربى فإن الشحنة الموجبة الحرة سوف « تسقط » نحو

أسفل هضبة الجهد إلى مناطق ذات جهد أقل ، بينما « ستسقط » الشحنة السالبة نحو أعلى هضبة الجهد . وفى كلتا الحالتين فإن الشحنتين ستخسران PE عندما « تسقطان » .

ولو أننا نعرف الفولطية V_{AB} بين A و B فإننا نستطيع حساب الشغل اللازم لتحريك شحنة من A إلى B . فباستخدام المعادلة (1-17) نجد :

$$\text{الشغل} = \Delta EPE = qV_{AB}$$

وينطبق هذا بنفس الدرجة على كل من الشحنات السالبة والموجبة لو أننا فقط تذكرنا أن نلاحظ إشارة كل من q و V_{AB} . ولكل من الشغل و ΔEPE السالبين نفس التفسير الذى كان لهما فى الميكانيكا .

مثال توضيحى 1-17

افرض أن المجال الكهربى بين اللوحين فى الشكل 1-17 كان 2400 N/C أو (V/m) . فلو أن المسافة بين اللوحين 0.5 cm فما هو فرق الجهد بينهما ؟

استدلال منطقى : المجال الكهربى ذو قيمة ثابتة ولذا فإن ،

$$V_{AB} = Ed = (2400\ \text{V/m})(0.5 \times 10^{-2}\ \text{m}) = 12\ \text{V}$$

أى أن اللوح الموجب B جهده $12\ V$ أعلى من الجهد عند اللوح A . ولو افترضنا أن الجهد عند اللوح A كان $V = 0$ ، فإن الجهد عند أية نقطة بين اللوحين وتبعد مسافة مقدارها x من اللوح A يعطى بالعلاقة :

$$V(\text{عند } x) = Ex$$

مثال 1-17 :

يحمل لوح مستو كثافة سطحية للشحنة مقدارها $-4.0\ \mu C/m^2$. لو أننا حددنا الجهد الكهربى عند اللوح بالمقدار $V = 0$ فكم يكون الجهد على بعد مقداره 2.0 cm ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد كيفية اعتماد الجهد الكهربى على المسافة ؟

الإجابة : إنه المجال الكهربى . فعندما يكون المجال الكهربى ثابتًا ، فإن $\Delta V = -E\Delta x$ ، لو أن Δx قيست على امتداد اتجاه E .

سؤال : ما هى العلاقة التى تعبر عن المجال الكهربى الناشئ عن صفيحة منفردة ذات شحنة منتظمة ؟

الإجابة : بالنسبة لنقط ليست بعيدة جدًا عن الصفيحة وفى مناطق بعيدة عن الحواف ، فإن المعادلة 8-16 تفيد بأن :

$$E = \sigma/2\epsilon_0$$

وهو مقدار ثابت كما قد لاحظنا بالفعل .

سؤال : ما هو اتجاه المجال .

الإجابة : بما أن الشحنة على الصفيحة سالبة ، لذا فإن المجال يتجه نحو الصفيحة (بمعنى أن شحنة اختبار موجبة سوف تنجذب نحو الصفيحة) . وهكذا فالتحرك بعيدًا عن الصفيحة يعنى التحرك نحو قيم أعلى للجهد الكهربى .

الحل والمناقشة : مقدار المجال الكهربى هو :

$$E = \frac{4.0\times10^{-6}\ \text{C/m}^2}{2(8.85\times10^{-12}\ \text{C}^2/\text{N.m}^2)}$$

$$= 2.26 \times 10^5\ \text{N/C} = 2.26 \times 10^5\ \text{V/m}$$

ويكون التغير فى الجهد عند تحركنا لمسافة 2.0 cm بعيدا عن الصفيحة هو

$$\Delta V = V - 0 = -(2.26 \times 10^5\ \text{V/m})(-0.020\ \text{m}) = +4520\ \text{V}$$

تأكد من فهمك لاستخدام الإشارات هنا . ومن المفيد تذكر أن التحرك إما بعيدًا عن شحنة سالبة أو نحو شحنة موجبة ، يعنى **زيادة** فى الجهد . أما التحرك نحو شحنة سالبة أو بعيدًا عن شحنة موجبة يعنى **انخفاضًا** فى الجهد .

مثال 17-2 :

افترض أن بروتونًا أطلق من السكون عند النقطة B فى الشكل 1-17 وفى نفس الوقت أطلق إلكترونًا من السكون عند النقطة A . أوجد مقدار السرعة التى تصطدم بها كل شحنة مع اللوح المقابل . اعتبر أن $V_{AB} = 54\ \text{V}$ وكتلة البروتون $m_p = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg}$ ، وكتلة الإلكترون m_e تساوى $9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg}$ و $e = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}$.

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد مقدار السرعة النهائية للجسيم ؟

الإجابة : ينطلق كل جسيم مشحون بقدر معين من طاقة الوضع الكهربية بالنسبة إلى اللوح المقابل . وتتحول هذه الطاقة (EPE) إلى طاقة حركة KE عندما يصل الجسيم إلى اللوح المقابل .

سؤال : ما هو التغير فى (EPE) الذى يمر به كل جسيم ؟

الإجابة : يحمل كل من الجسيمين نفس الشحنة ولكن بإشارات متضادة . أما البروتون « فيهبط » خلال **انخفاض** فى الجهد مقداره 45 V ، والإلكترون « يهبط » خلال **ارتفاع** مقداره 45 V . أى أن كلاً منهما سيفقد نفس المقدار من طاقة الوضع PE . فبالنسبة للبروتون :

$$\Delta\text{PE} = (+e)\,(V_A - V_B) = (+1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(-45\ \text{V})$$

وبالنسبة للإلكترون :

$$\Delta PE = (-e)(V_B - V_A) = (-1.6 \times 10^{-19}\ C)(+45\ V)$$

سؤال : وهل يقتضى هذا أنهما سيصطدمان باللوحين بنفس مقدار السرعة ؟

الإجابة : لا . إنهما يكتسبان نفس المقدار من طاقة الحركة KE ولكن السرعة تعتمد على الكتلة ، وهى متباينة جدًا بالنسبة للجسمين . ولعلك تذكر أن $KE = \frac{1}{2}mv^2$

الحل والمناقشة : مقدار طاقة الوضع المفقودة فى كلتا الحالتين هو :

$$\Delta PE = -7.2 \times 10^{-18}\ J$$

وهو ما يساوى طاقة الحركة المكتسبة :

$$\Delta KE = \frac{1}{2}m_e v_e^2 = \frac{1}{2}m_p v_p^2 = -\Delta PE$$

وعلى هذا فإن :

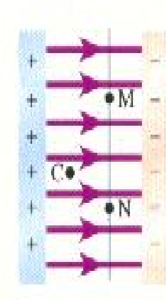
$$v_e = \sqrt{\frac{2(7.2\times10^{-18}\ J)}{9.1\times10^{-31}\ kg}} = 4.0 \times 10^6\ m/s$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2(7.2\times10^{-18}\ J)}{1.67\times10^{-27}\ kg}} = 9.3 \times 10^4\ m/s$$

لاحظ مدى الفرق بين النتيجتين والذى سببه الاختلاف الكبير بين الكتلتين .

17-3 متساويات الجهد

لنقم الآن بإلقاء نظرة على نقط أخرى غير A و B فى المنطقة الواقعة بين اللوحين المشحونين المتوازيين . وقد نسأل ، مثلاً ، عن فرق الجهد بين النقطتين M و N فى الشكل 3-17 . وحيث أن فرق الجهد هو ببساطة الشغل المبذول على وحدة الشحنات (المعادلة 3-17) . فعلينا أن نحسب الشغل اللازم بذله لتحريك وحدة شحنات الاختبار الموجبة من النقطة M إلى N . ويلاحظ أنه للاحتفاظ بشحنة للاختبار فى مكانها فلابد من التأثير بقوة إلى اليسار عليها . . وهذه القوة مطلوبة لإحداث التوازن مع تأثير المجال الكهربى على شحنة الاختبار . فإذا حركنا الشحنة من M إلى N فإن قوة إحداث التوازن لن تبذل شغلاً لأن اتجاه الحركة متعامد مع اتجاه القوة . وبالفعل فإننا نعرف إنه ليست هناك حاجة لبذل أى شغل لتحريك شحنة الاختبار فى اتجاه متعامد مع المجال الكهربى . وهكذا فإنه لا يوجد فرق جهد بين النقطتين M و N فى الشكل 3-17 . وفى الواقع فإنه لابد أن يكون واضحًا أن كل النقط الواقعة على الخط المار خلال M و N تقع عند نفس الجهد ؛ أى لا يوجد بينها أى فرق للجهد . وسنطلق على هذا الخط ذى الجهد الثابت **خط تساوى الجهد** . وعلاوة على ذلك فإن المستوى الذى يمر بذلك الخط ويكون موازيًا للوحين هو الآخر مستوى ذو جهد ثابت وسنطلق عليه مستوى تساوى الجهد . ولا شغل يبذل لتحريك شحنة على امتداد خط تساوى الجهد أو فى مستوى

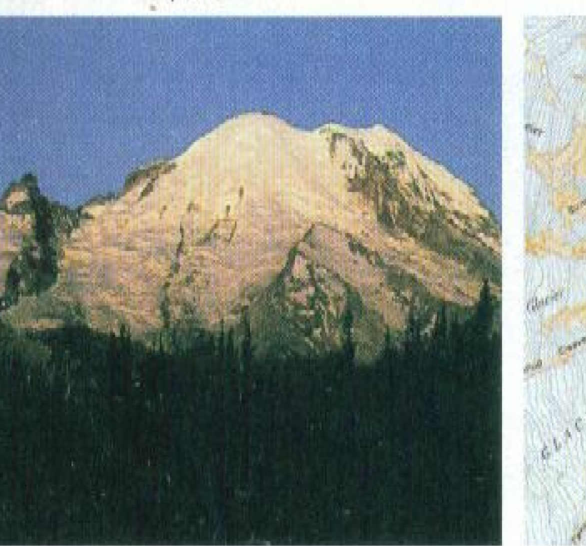


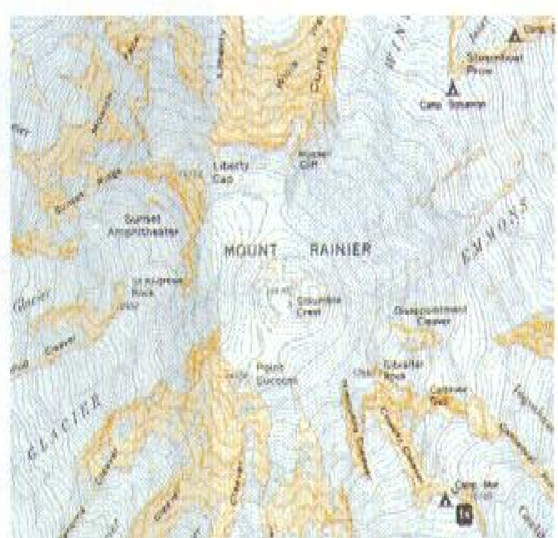
شكل 3-17:
تقع النقطتان M و N على خط تساوى الجهد .

تساوى الجهد، ولا شغل يبذل لتحريك شحنة على امتداد خط تساوى الجهد أو فى مستوى تساوى الجهد لأن مثل هذه الحركة تكون دائمًا متعامدة مع خطوط القوة أى مع المجال الكهربى أو بطريقة عكسية ، إن **خطوط القوة تكون دائمًا متعامدة مع خطوط تساوى الجهد .**

وكما سبق أن فعلنا فى حالة الجاذبية ، فإننا نستطيع إثبات أن الشغل المبذول فى تحريك شحنة بين نقطتين فى وجود مجال كهربى لا يعتمد على المسار المتبع بين الشحنتين . وأى مسار بين النقطتين M و N فى الشكل 3-17 يمكن اختزاله إلى مجموعة من الخطوات الصغيرة التى إما أن تكون موازية أو متعامدة مع خطوط تساوى الجهد . وحيث أنه لن يبذل شغل فى القطاعات الموازية لمستويات الجهد ، فإن الشغل يكون متناسبًا كلية مع الفرق بين إحداثيات النقطتين M و C مقاسة عموديًا على اللوحين . ونستنتج من ثم أن :

لا شك أننا نعرف خرائط المناسيب أو الخرائط الطبوغرافية والتى تبين الخطوط المناظرة للارتفاعات المتساوية كما فى حالة خريطة هذا الجبل . فالنقطة الواقعة عند نفس الارتفاع يكون لها نفس الجهد التثاقلى (جهد الجاذبية) ولذلك فإن خطوط المناسيب تعتبر خطوط تساوى الجهد بالنسبة للمجال التثاقلى (مجال الجاذبية) .



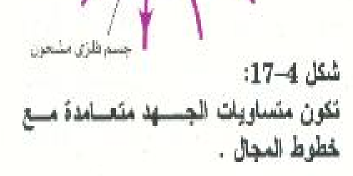


فرق الجهد الكهربى بين نقطتين لا يعتمد على اختيار المسار المقطوع بين النقطتين وتبين لنا هذه الخاصية أن المجال الكهربى الاستاتيكى ـ الساكن هو مجال احتفاظى .

وبالفعل فإن هذه الملاحظة ضرورية لنا حتى نتمكن من تعريف طاقة الوضع الكهربية ، وتطبيق بقاء الطاقة على مسائل كما فعلنا لتونا .

وقبل أن نترك مناقشة متساويات الجهد فلابد من استحضار بعض النتائج السابقة من القسم 13-16 بالنسبة للموصلات الموجودة فى مجالات كهربية . وحيث أنه لا يمكن لأى مجال كهربى أن يتواجد فى أى مكان داخل موصل تحت ظروف استاتيكية لذلك نستنتج أن :

حجوم وأسطح الموصلات تعتبر حجوم وأسطح تساوى الجهد تحت ظروف كهروستاتيكية .



شكل 4-17:
تكون متساويات الجهد متعامدة مع خطوط المجال .

مثال توضيحى 2-17

خطوط متساويات الجهد وخطوط المجال الكهربى بالقرب من جسم معدنى صلب مشحون .

استدلال منطقى : انظر إلى الجسم المعدنى المشحون المبين بالمقطع المستعرض فى الشكل 17-4 . حيث أن الجسم يعتبر حجمًا متساوى الجهد لذلك فإن سطحه هو الآخر سطح تساوى الجهد . وبما أن خطوط القوة لابد وأن تكون متعامدة مع خطوط تساوى الجهد وأسطح تساوى الجهد ، فلابد أن تكون خطوط المجال الكهربى متعامدة مع سطح الجسم كما أن أسطح تساوى الجهد بالقرب من الموصل تتبع مناسيب السطح بدقة .

تمرين : افرض أن الجسم الموضح فى شكل 17-4 يرصد من مسافة بعيدة حتى ليبدو كنقطة صغيرة . ارسم متساويات الجهد وخطوط المجال كما ترصد فى هذه الحالة .

الإجابة : **تكون خطوط المجال قطرية (شعاعية) وتكون متساويات الجهد دوائر .**



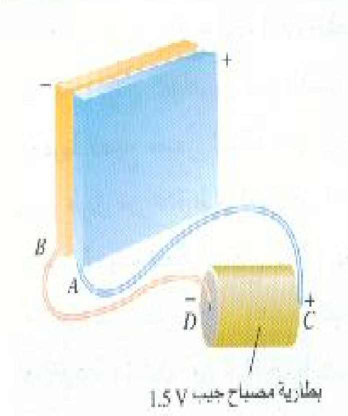
هناك أنواع وأحجام عديدة من البطاريات ، اعتمادًا على الفولطية والقدرة المقرر الحصول عليهما منها . وتتراوح النماذج المبينة هنا بين 1.5 V إلى 12 V .

17-4 البطاريات كمصادر للطاقة الكهربية

إن من أسهل الطرق للحصول على فرق للجهد بين نقطتين هو باستخدام بطارية وهناك العديد من أنواع البطاريات وأغلبها بالضرورة من النبيطات الكيميائية . فبطارية خلية الرصاص المستخدمة فى السيارات ، مثلا ، تستعمل التفاعل الكيميائى لتوفير الطاقة . ويعتبر نفس الشىء حقيقيًا بالنسبة « للخلية الجافة » والتى لا يعتبر باطنها جافًا على الرغم من التسمية . وبالإضافة إلى البطارية الكيميائية فقد أصبحت أطرزة أخرى شائعة هذه الأيام . ولعلك قد سمعت عن الخلايا الشمسية التى تستخدم لتوفير الطاقة للساعات والآلات الحاسبة اليدوية التى تستمد طاقتها من الشمس ، بل وعن الأغراض الأخرى الأكثر إثارة . والخلايا الشمسية التى تعمل على مبادئ مختلفة تمامًا عن البطاريات الكيميائية ، وتقوم بتحويل الضوء مباشر إلى طاقة كهربية . ويتم حاليًا

تطوير أطرزة أخرى من البطارية غير الكيميائية . وعلى الرغم من هذا التنوع الكبير إلا أن الغرض من أية بطارية هو فى النهاية توفير طاقة كهربية .

ولكل بطارية بسيطة طرفان (عمودان معدنيان) يوفران وسيلة لتوصيل الأسلاك إلى البطارية . والكمية التى عادة ما تسمى الفولطية هى فى الواقع فرق الجهد بين طرفى البطارية وهو 1.5 V بالنسبة لبطارية مصباح الجيب و 12 V بالنسبة لبطارية السيارة . وعندما يوصَّل طرفا البطارية بواسطة أسلاك إلى لوحين معدنيين كما فى الشكل 5-17 فإن الإلكترونات تسرى من الطرف السالب إلى أحد اللوحين (B فى الشكل 5-17) حتى يتخذ شحنة سالبة . ومصدر هذه الإلكترونات هو اللوح الآخر A وهو لهذا يصبح وقد صار لديه نقص فى الإلكترونات واكتسب بهذا شحنة موجبة صافية لها نفس المقدار . وبهذه الطريقة يمكن وصف البطارية على أنها « مضخة شحنات » يستخدم فيها مختلف العمليات الفيزيائية الداخلية لإنتاج الطاقة اللازمة لإتمام هذه الانتقال للشحنات .



شكل 5-17:
فرق الجهد من B إلى A هو 1.5 V ويمثل القوة الدافعة الكهربية للبطارية . والطرف C موجب وجهده أعلى بمقدار 1.5 V من الطرف D .

وكما أشير فى القسم 14-16 فإن الرمز المستخدم للبطارية هو ─┤|+├─ . وعادة ما ترفع علامة الموجب والسالب من على الرمز ومن المتوقع أن يصبح معروفًا أن الخط الأطول يمثل الطرف الموجب . وكثيرًا ما يزود الطرف الموجب للبطارية بعلامة الموجب أو يدهن باللون الأحمر .

ويعتمد فرق الجهد بين طرفى البطارية ـ إلى حد ما ـ على عما إذا ما كانت الشحنة تسرى من البطارية أم لا . وحين لا تسرى أية شحنة من البطارية فإن فرق جهدها يسمى عندئذ **القوة الدافعة الكهربية (emf)** للبطارية . وقد احتفظ بهذا المصطلح من القرن الماضى وهو فى الواقع مصطلح مغلوط لأن ما يطلق عليه (emf) ليس قوة على الإطلاق وإنما يمثل **فولطية** . على أنه فى كثير من التطبيقات يمكن اعتبار القوة الدافعة الكهربية للبطارية وفرق الجهد بين طرفيها ـ حتى عندما تسرى الشحنات منها ـ شيئًا واحدًا وسوف نشير إلى القوة الدافعة الكهربية (emf) بالرمز $\mathscr{E}$ على ألا يختلط هذا مع الرمز E لشدة المجال الكهربى .

سنقوم الآن بفحص الموقف الموضح فى الشكل 5-17 بشىء من التفصيل . عندما يوصل اللوحان المعدنيان اللذان هما فى الأصل غير مشحونين بالبطارية بواسطة سلكين معدنيين ، فإن الشحنات تسرى لفترة زمنية وجيزة إلى أن تنشر البطارية الشحنات على اللوحين . وبعد ذلك لن يسرى مزيد من الشحنات ويصبح الموقف كهروستاتيكيًا . وسوف نتذكر أن المعادن عبارة عن حجوم تساوى الجهد تحت الظروف الكهروستاتيكية ، ومن ثم يكون السلك الواصل من الطرف C إلى اللوح A واللوح نفسه عند نفس الجهد . وبالمثل فإن الطرف D ـ الذى يكون عند جهد أقل بما مقداره 1.5 V عن الطرف C ـ عند نفس جهد اللوح B . وعلى هذا يكون فرق الجهد بين اللوحين A و B هو 1.5 V بحيث يكون اللوح A ذا جهد أعلى لأنه موجب . وهكذا نستنتج أن : تحت ظروف كهروستاتيكية فإن :
فرق الجهد بين جسم معدنى متصل بأحد طرفى بطارية وجسم معدنى آخر متصل بالطرف الآخر يكون مساويًا لفرق الجهد الطرفى للبطارية .

وقد رأينا فى القسم 17-2 أن الشحنات على اللوحين المشحونين لهما طاقة وضع كهربية ، ولأن اللوحين فى الشكل 17-5 يكتسبان شحناتهما من البطارية ، فإن البطارية تصبح مصدرًا للطاقة التى تمثلها الشحنات الموجودة على اللوحين . وليس هذا سوى طريق من عدة طرق تعمل فيها البطارية كمصدر للطاقة . إذ عندما تضىء بطارية مصباح الجيب فتيلة المصباح ، فإن ما يصدر عن المصباح من طاقة حرارية وضوئية إنما يستمد من البطارية . . وعندما تقوم البطارية بتشغيل محرك كهربى فإن الطاقة الميكانيكية الناتجة عن المحرك تستمد من البطارية ومع تقدمنا فى دراسة الكهربية فإننا سنوالى تعلم المزيد عن مصادر أخرى للطاقة الكهربية .

مثال 17-3 :

ما هو الشغل الذى تبذله بطارية 12.0 V فى تحريك شحنة مقدارها 1 C من الطرف السالب إلى الطرف الموجب ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يرتبط الشغل بالفولطية ؟

الإجابة : تنص المعادلة 17-3 على أن $W = q\Delta V$.

سؤال : ما هو فرق الجهد عند الانتقال من الطرف السالب إلى الطرف الموجب ؟

الإجابة : +12 V .

الحل والمناقشة : الشغل موجب

$$W = (1\ C)(+12.0\ V) = +12.0\ J$$

تتفق هذه الإجابة مع النص السابق على أن الشحنة الموجبة تزيد من EPE لها عند تحريكها من الجهد الأقل إلى الجهد الأعلى .

تمرين : ما مقدار الشغل المبذول فى تحريك مليون إلكترون من الطرف الموجب إلى الطرف السالب ؟ **الإجابة** : 1.92×10^{-12} J .

شكل 17-6:
هل يزيد البروتون من سرعته أم يتباطأ عندما يأخذ فى الحركة نحو اللوح B ؟

مثال 17-4 :

البروتون الموضح فى الشكل 17-6 مقذوف من اللوح A نحو اللوح B . وهو يغادر اللوح A بسرعة مقدارها 8×10^6 m/s . وقد وصلت بطارية 10,000 V بين اللوحين المعدنيين كما هو موضح . ما هو مقدار السرعة التى يتحرك بها البروتون بمجرد اصطدامه باللوح B ؟ أعد نفس المسألة بنفس الأرقام بالنسبة للإلكترون .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يربط بين تغير مقدار السرعة والفولطية ؟

الإجابة : تمثل الحركة خلال فرق للجهد تغيراً فى طاقة الوضع الكهربية EPE . وهذا التغير يؤدى بدوره إلى تغير فى طاقة الحركة ومن ثم فى مقدار السرعة لأن الطاقة لابد وأن تكون محفوظة (باقية) :

$$\Delta EPE = q\Delta V = -\Delta KE$$

سؤال : هل يتحرك البروتون نحو الجهد الأعلى أم الأقل ؟

الإجابة : يشير رمز البطارية إلى أن اللوح B عند جهد أعلى بما مقداره 10,000 V عن الجهد عند A .

سؤال : ما هى المعادلة المحددة لتعيين مقدار سرعة البروتون ؟

الإجابة : $\frac{1}{2}m_p(v_B^2 - v_A^2) = -(+e)(v_B - V_A)$

سؤال : ما وجه اختلاف الموقف فى حالة الإلكترون ؟

الإجابة : سوف تحل m_e محل m_p والشحنة $-e$ محل $+e$.

الحل والمناقشة : بالنسبة للبروتون فإن الأرقام تؤدى إلى

$$v_B^2 = v_A^2 - \frac{2e(V_B - V_A)}{m_p} = (8 \times 10^6 \text{ m/s})^2 - \frac{2(1.6\times10^{-19}\text{C})(10^4\text{ V})}{1.67\times10^{-27}\text{kg}}$$

وهكذا فإن :

$$v_B = 7.9 \times 10^6 \text{ m/s}$$

أى أن البروتون يتباطأ كما ينبغى له عندما يتحرك نحو الجهد الأعلى وبالنسبة للإلكترون فإن التحرك نحو الجهد الأعلى يعنى زيادة مقدار سرعته :

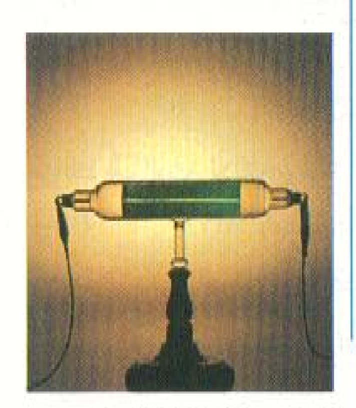
$$v_B^2 = v_A^2 - \frac{2(-e)(V_B - V_A)}{m_e}$$

لاحظ كيف أن الحد الثانى فى الطرف الأيمن من المعادلة يضاف فى هذه الحالة . ولابد أن تستطيع إثبات أن :

$$v_B = 6.0 \times 10^7 \text{ m/s}$$

وسيكون مقدار سرعة الإلكترون أقل قليلاً - فعليًا - عن هذه القيمة ، لأن معادلات النظرية النسبية لابد وأن تستخدم عندما تقترب مقادير السرعات من سرعة الضوء . (انظر القسم 11-3) .

تمرين : ما هو فرق الجهد الذى لابد أن يوجد بين اللوحين لو أن البروتون كان عليه أن يتوقف قبل أن يصل إلى B مباشرة ؟ **الإجابة : 3.34×10^5 V** .



فرق الجهد (الفولطية) المرتفع بين قطبين فى أنبوبة مفرغة يمكن أن يجعل حزمة من الإلكترونات تسرى بين القطبين . والقطب الذى تنبعث منه الإلكترونات يشار إليه على أنه المهبط ولذا تسمى الإلكترونات فى هذه الحزمة **أشعة المهبط** .

17-5 الإلكترون فولت

لابد وأنك قد أصبحت تعرف أن وحدة SI للطاقة هى الجول . على أن وحدة أخرى للطاقة تستخدم فى مجالى الفيزياء الذرية والفيزياء النووية . وتستخدم هذه الوحدة على

نطاق واسع بحيث لابد لنا من الاعتياد عليها . وتعْرف هذه الوحدة بدلالة طاقة شحنة مقدارها e اكتسبتها عند تحركها خلال فرق للجهد مقداره فولت واحد :

والكترون فولت واحد (eV) هو الطاقة التى تكتسبها شحنة مقدارها e+ عندما تتحرك خلال فرق للجهد مقداره فولت واحد .

إن طاقة الحركة التى تكتسبها شحنة مقدارها q كولوم عندما تتحرك بحرية خلال فرق للجهد مقداره ΔV فولت :

$$\Delta KE\ (J) = -\Delta PE = q\ (C)\ \Delta V(V)$$

ومن التعريف السابق للإلكترون فولت فإن ،

$$\Delta KE(eV) = q\ (\text{بوحدات } e)\ \Delta V(V) \qquad (17\text{-}4)$$

وبمقارنة المعادلتين المعبرتين عن ΔKE نحصل على :

$$\Delta KE\ (eV) = \Delta\ KE\ (J)\ \frac{q(\text{بوحدات } e)}{q(C)}$$

وبما أن $1\,e = 1.602 \times 10^{-19}$ C فإن :

$$\Delta KE\ (eV) = (1.602 \times 10^{-19})\ \Delta KE\ (J)$$

وهكذا فإن معامل التحويل بين الإلكترون فولت والجول هو

$$1\ eV = 1.602 \times 10^{-19}\ J \qquad (17\text{-}5)$$

فى الفيزياء الذرية والنووية ، تحمل الجسيمات شحنات هى عبارة عن مضاعفات صحيحة للشحنة e أى 1.602×10^{-19} C ولذا كانت تلك الشحنات ، مقاسة بوحدات e إما الوحدة أو أرقام صحيحة صغيرة أخرى .

وعندما يتحرك بروتون بحرية خلال فرق للجهد مقداره 1000 V مثلاً فإن طاقته ، طبقًا للمعادلة (4-17) هى

$$\Delta KE = (1e)\ (1000\ V) = 1000\ eV$$

وبالمثل ، فلو أن جسيمًا ذا شحنة مقدارها $3e$ قد تحرك خلال فرق للجهد مقداره 1000 V فإن الطاقة التى سيكتسبها هى $3 \times 1000 = 3000$ eV . وعلى الرغم من أن وحدة الإلكترون فولت لا يمكن أن تستخدم فى معادلاتنا المبنية على وحدات SI ، إلا أن كونها ملائمة عند التعامل مع الجسيمات الأولية التى نلتقى بها فى الفيزياء الذرية والفيزياء النووية قد رسخ من استخدامها فى العلم .

مثال توضيحى 3-17

يستلزم اقتلاع إلكترون واحد منفرد من ذرة هيدروجين ليصبح حرًا طاقة مقدارها 13.6 eV . افترض أننا نرغب فى اقتلاع إلكترون ليصبح حرًا عن طريق قذف ذرات الهيدروجين ببروتونات عجِّلت (سرِّعت) خلال فرق للجهد V_{AB} . ما هو الحد الأدنى المطلوب لهذا المقدار V_{AB} ؟

استدلال منطقى : لابد أن يكون لدى كل بروتون طاقة مقدارها 13.6 eV على الأقل . وحيث أن كل بروتون له شحنة مقدارها 1.602×10^{-19} C ، لذا فطاقة كل بروتون مساوية عدديًا لفرق الجهد الذى تتحرك خلاله . ولهذا فإن فرق الجهد المطلوب هو 13.6 V .

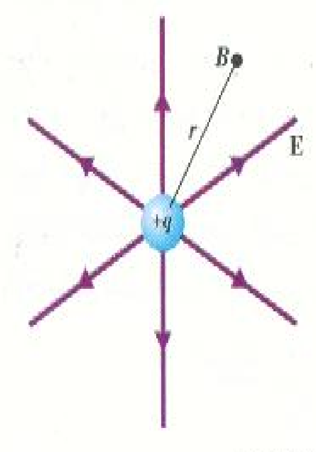
تمرين : أعد هذه المسألة لو كانت المقذوفات هى أيونات شحنة كل منها $3e$.

الإجابة : 4.53 V .

17-6 الجهود المطلقة

لقد اهتممنا حتى الآن بفروق الجهد فقط والسبب فى ذلك ، أنه مثلما كان الحال فى الجهد التثاقلى ، يكون اختيار موقع تكون فيه طاقة الوضع صفرًا مجرد مسألة اتفاق . ويمكن قياس طاقة الوضع التثاقلية بالنسبة لأية نقطة نختارها : مثل سطح منضدة ، أو سطح الأرض ، أو سطح مبنى أو أى مكان آخر . وبالمثل ففى مسائل طاقة الوضع الكهربية يكون تحديد الموقع الصفرى لطاقة الوضع مسألة اختيار . وفى نظرية الدوائر الكهربية ، قد يوصل سلك معين فى الدائرة بالأرض (ربما يتصل بإحدى أنابيب المياه) ، حيث تكون هذه النقطة عادة ذات طاقة وضع مقدارها صفر . على أننا غالبًا ما نستعمل صفرًا آخر بالنسبة للجهد الكهربى كما سنرى بعد قليل .

عندما نتناول شحنات نقطية كالذرات والجزيئات فإنه من المناسب تحديد صفر الجهد على أنه يقع عند مسافة لا نهائية من الشحنة . وفى هذه الحالات فإن الجهد عند أية مسافة محددة r سيقال إنه **جهد مطلق** عند تلك النقطة والحقيقة إن ما نقوم بعمله هو ما يلى . لقد ناقشنا حتى الآن حالات مختلفة بدلالة فروق الجهد V_{AB} . أما الآن فسوف ننص على أن النقطة A سيفترض أنها تقع عند المالانهاية . ثم ننص على أن الجهد عند المالانهاية سيعتبر صفرًا بحيث يصبح الجهد عند B هو ما نشير إليه على أنه الجهد المطلق عند B وعلينا أن نلاحظ بدقة أنه **عندما نتحدث عن الجهد المطلق فى نقطة ما فإننا نتحدث ، فى الحقيقة ، عن فرق الجهد بين تلك النقطة والمالانهاية .**



شكل 7–17: يُعرَّف الجهد المطلق عند B على أنه الشغل المبذول فى حمل شحنة اختبار موجبة من مالانهاية حتى النقطة B .

سنقوم الآن بإيجاد معادلة للجهد المطلق الناشئ عن شحنة منعزلة مقدارها $+q$ ، كالتى ترى فى الشكل 7–17 . ونحتاج إلى حساب الشغل اللازم بذله لإحضار شحنة اختبار موجبة q_t من $r = \infty$ حتى نقطة تبعد مسافة r عن q . ولن يكون هذا بسيطًا مثلما أوجدنا فرق الجهد بين لوحين مشحونين ، لأننا لم يعد لدينا قيمة ثابتة للمجال E . وفى المقابل فإن علينا حساب الشغل المبذول بواسطة قوة تتغير تبعًا لتغير $1/r^2$. وإجراء ذلك بشكل صحيح يستوجب معرفة طرق التفاضل والتكامل ولهذا سنذكر ببساطة نتائج الحسابات بتلك الطرق :

$$W(\infty \to r) = q_t \frac{kq}{r}$$

حيث k هو الثابت المذكور فى قانون كولوم للقوة . وعندما نقسم الطرفين على q_t فإننا نحصل على تعبير للجهد المطلق V_{abs} الناشئ عن شحنة نقطية منعزلة q (أو عن توزيع كروى التماثل للشحنة)

$$V_{abs} = \frac{W(\infty \to r)}{q_t} = \frac{kq}{r} \qquad (17\text{-}6)$$

ويعتبر هذا التعبير قائمًا بالنسبة لشحنة نقطية سالبة . وتفيد المعادلة 6-17 بمعلومة مهمة هى :

إن V_{abs} الناشئ عن شحنة موجبة q يكون له قيم موجبة عند جميع المسافات r بعيدًا عن q . وبالنسبة لشحنة سالبة $-q$ فإن V يكون سالبًا عند جميع المسافات r .

وهكذا فإننا نستطيع استعمال هذه النتائج فى حساب الجهد المطلق عند نقطة ما ، والناشئ عن مجموعة من الشحنات النقطية . وبما أن الجهد كمية قياسية ، فلن نحتاج سوى لحساب مقادير V_{abc} لكل شحنة منفردة ثم نجمع إسهامات الشحنات جمعًا جبريًا .

مثال 5-17 :

افترض أن $r = 50$ cm وأن $q = 5.0 \times 10^{-6}$ C فى الشكل 7-17 . ولو أن بروتونًا أطلق عند النقطة B ، فكم سيكون مقدار سرعته عندما يبتعد كثيرًا ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يربط بين مقدار السرعة والمسافة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : مثلما فعلنا فى السابق ، فإن البروتون سيكتسب KE كلما فقد PE عند تحركه نحو جهد أقل .

سؤال : ماذا يعنى مصطلح « عندما يبتعد كثيرًا » ؟

الإجابة : من الناحية العلمية فإنه يعنى أن يكون بعيدًا بما فيه الكفاية لكى تصبح القيمة النهائية للجهد صفرًا بالضرورة .

سؤال : كيف تحصل على القيمة الابتدائية للجهد ؟

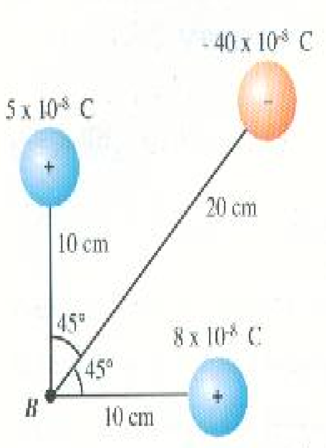
الإجابة : عليك بتقدير قيمة V_{abc} عند مسافة 50 cm من الشحنة $+5\,\mu$C :

$$V_{abc} = \frac{kQ}{r} = \frac{(9\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2)(5\ \mu\text{C})}{0.5\ \text{m}}$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تتيح الحصول على مقدار السرعة المكتسبة ؟

الإجابة : $e\,\Delta V = eV_{abc} = \frac{1}{2} m_p v^2$

الحل والمناقشة : أولاً ، الجهد الابتدائى هو :



شكل 17-8:
أوجد الجهد المطلق عند النقطة B والناشئ عن الشحنات الثلاث .

$$V_{abc} = \frac{kQ}{r} = \frac{(9\times10^{9}\ N.m^{2}/C^{2})(5\ \mu C)}{0.5\ m} = +90\ kV$$

ومن ثم يفقد البروتون مقدارًا من طاقة الوضع يساوى :

$$\Delta PE = (1.6\times10^{-19}\ C)(-90\times10^{3}\ V) = -1.44\times10^{-14}\ J$$

ويمكن الحصول على السرعة المكتسبة من المعادلة $\Delta KE = -\Delta PE$:

$$\frac{1}{2}\ (1.67\ \times10^{-27}\ kg)\ v^2 = 1.44\times10^{-14}\ J$$

$$v = 4.15\times10^{6}\ m/s$$

تمرين : لكى تستشعر معنى « بعيدًا جدًا » الوارد فى هذا المثال ، عليك حساب المسافة التى يهبط عندها الجهد إلى 900 V (أى إلى نحو واحد بالمائة من الجهد عند الموضع الأصلى للبروتون) . **الإجابة :** 50 m .

مثال 17-6

احسب قيمة الجهد المطلق عند النقطة B بالقرب من الشحنات النقطية الثلاث فى الشكل 17-8 .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن حساب الجهد عندما يكون هناك أكثر من شحنة نقطية ؟

الإجابة : يمكنك حساب الجهد عند B ، الناشئ عن كل شحنة بمفردها وكما لو كانت الشحنات الأخرى غير موجودة . ويكون الجهد الكلى هو حاصل الجمع الجبرى للإسهامات المنفردة . ومرة أخرى هذا هو مبدأ التراكب ولكنه هنا باستخدام كميات **قياسية** .

سؤال : وما هو التعبير المستخدم لكل إسهام ؟

الإجابة : $V = kQ/r$ ، حيث r هى بعد كل شحنة عن B .

سؤال : ما هو مدلول إشارات الشحنات ؟

الإجابة : لنتذكر ، أن الشحنات الموجبة تنشئ جهودًا مطلقة موجبة فقط ، وتنتج الشحنات السالبة جهودًا سالبة فقط . وعليك أن تحافظ على الإشارات المقترنة بكل حد حين تقوم بجمعها .

الحل والمناقشة : يوضح الشكل 17-8 المسافات المختلفة . والإسهامات المختلفة فى الجهد عند B هى :

$$V_1 = \frac{(9\times10^{9}\ N.m^{2}/C^{2})(+5.0\times10^{-8}\ C)}{0.10\ m} = +4500\ V$$

$$V_2 = \frac{(9\times10^{9}\ N.m^{2}/C^{2})(-40\times10^{-8}\ C)}{0.20\ m} = -18000\ V$$

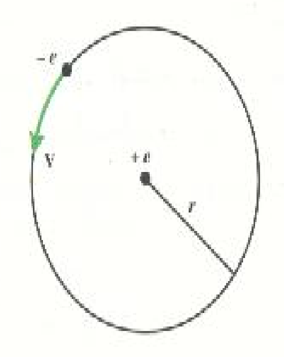
$$V_3 = \frac{(9\times10^9\ N.m^2/C^2)(+8\times10^{-8}\ C)}{0.10\ m} = +7200\ V$$

والجهد الكلى عند B هو :

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3$$
$$= 4500\ V + (-18000\ V) + 7200\ V = -6300\ V$$

لاحظ مدى بساطة هذه الحسابات بالمقارنة مع حساب المجال الكهربى . فمع الجهود لن تكون بحاجة إلى مركبات المتجهات ، وإنما لمجرد أرقام موجبة وسالبة تقوم بجمعها .

تمرين : ما هو مقدار الطاقة المطلوب لإحضار إلكترون إلى النقطة B من مسافة بعيدة جدًا ؟ **الإجابة** : $+6300\ eV$ أو $1.01\times10^{-15}\ J$.



شكل 9-17:
نموذج بوهر لذرة الهيدروجين . يتحرك الإلكترون فى مدار دائرى نصف قطره $0.053\ nm$ حول مركز الذرة .

مثال 7-17 :

فى نموذج بوهر لذرة الهيدروجين المرسومة تخطيطيًا فى الشكل 9-17 يتحرك الإلكترون المثل بنقطة $(q = -e)$ فى مدار دائرى نصف قطره $r = 0.053\ nm$ مع وجود بروتون $(q = +e)$ فى المركز . (أ) احسب طاقة الوضع الكهربية وطاقة الحركة لإلكترون فى المدار . (ب) إثبت أنه كما ذكر فى المثال التوضيحى رقم 3-17 ، فإن طاقة مقدارها 13.6 eV ضرورية لأن تستمد من مصادر خارجية حتى تجذب الإلكترون وتحرره من الذرة ، بمعنى أن تؤين الذرة .

استدلال منطقى :

سؤال : هل أستطيع ، حال تحرك الإلكترون ، أن استخدم المعادلة الاستاتيكية لحساب طاقة الوضع الكهربية (EPE) بين شحنتين نقطيتين ؟

الإجابة : نعم . فعلى الرغم من تحرك الإلكترون ، إلا أن المسافة r تظل ثابتة . وإلى جانب الشحنة فهذه هى الكمية الوحيدة التى تعتمد عليها EPE .

سؤال : ما هى المعادلة الخاصة بطاقة الوضع الكهربية للإلكترون ؟

الإجابة : إننا نختار أن تكون طاقة الوضع الكهربية صفرًا عند $r = \infty$ ، حيث تكون القوة التى يؤثر بها كل من الإلكترون والبروتون أحدهما على الآخر صفرًا ومن ثم فإن :

$$(EPE) = (-e)\ V_{abs}$$

حيث V_{abs} هو الجهد المطلق ، الناشئ عن وجود البروتون ، على مسافة تساوى نصف قطر مدار الإلكترون .

سؤال : ما هو الجهد المطلق على مسافة r من البروتون ؟

الإجابة : $V_{abs} = \frac{ke}{r}$. ومن ثم فإن $EPE = (-e)\ V = -\frac{ke^2}{r}$. وعليك ملاحظة أن الإلكترون ستكون له قيمة سالبة للكمية EPE عند جميع قيم r .

سؤال : ما هو نوع الحركة التى يقوم بها الإلكترون ؟

الإجابة : إنها حركة دائرية بسرعة ثابتة المقدار .

سؤال : وما هى المعادلة التى تصف هذا النوع من الحركة ؟

الإجابة : يتطلب قانون نيوتن الثانى أن تكون القوة الصافية المؤثرة على الإلكترون مساوية لحاصل ضرب كتلته فى تسارع (عجلة) الجذب المركزى له :

$$F_{net} = m_e \frac{v^2}{r}$$

سؤال : ما هى القوة الصافية المؤثرة على الإلكترون ؟

الإجابة : إنها القوة الكهربية ، التى يُعطى مقدارها بقانون كولوم :

$$F = \frac{k(e)(e)}{r^2}$$

سؤال : كيف ترتبط معادلة قوة الجذب المركزى مع طاقة حركة الإلكترون ؟

الإجابة : لاحظ أنه ، بما أن $KE = \frac{1}{2}mv^2$ ، فإن معادلة قوة الجذب المركزى يمكن كتابتها على الصورة :

$$F_{net} = \frac{2(KE)}{r}$$

وهكذا تستطيع أن تحصل على KE من :

$$KE = \left(\frac{r}{2}\right)F_{net} = \frac{r}{2}\,\frac{ke^2}{r^2} = \frac{ke^2}{2r}$$

و KE كمية موجبة كما هو شأنها دائمًا . **لاحظ أن مقدارها هو نصف مقدار PE تمامًا .**

سؤال : ما الذى لابد من حدوثه للإلكترونات التى ستنتزع من الذرة وتحرر ؟

الإجابة : لو أن الإلكترون كان مثبتًا على بعد r من البروتون ، فإن مقدارًا من الشغل يساوى طاقة وضعه PE ، كان سيصبح لزامًا بذله على الإلكترون عندما يجذب حتى $r = \infty$:

$$W = PE(\infty) - PE(r) = 0 - \left(\frac{-ke^2}{r}\right) = \frac{ke^2}{r}$$

وقد تكون إحدى طرق إجراء ذلك هى بإعطاء الإلكترون هذا القدر تمامًا من KE فى موضعه الابتدائى حتى يصبح قادرًا على الوصول إلى $r = \infty$ قبل أن يتوقف تمامًا . على أن الإلكترون **ليس** مثبتًا ، فلديه بالفعل طاقة حركة مقدارها $KE = \frac{1}{2}(ke^2/r)$. وعلى هذا فطاقة الحركة KE **الإضافية** التى عليه اكتسابها (ربما عند اصطدامه بذرة أخرى) حتى يتحرر لن تكون سوى $\frac{1}{2}ke^2/r$ أخرى .

الحل والمناقشة : لقد وجدنا أن الجهد نتيجة وجود البروتون هو :

$$V_{abc} = \frac{ke}{r}$$

$$= \frac{(9\times10^{9}\ N.m^{2}/C^{2})(1.6\times10^{-19}\ C)}{5.3\times10^{-11}\ m}$$

$$= 27.2\ V$$

ونستطيع من ثم القول بأن طاقة وضع الإلكترون PE هى

$$PE = (-e)\ V_{abc} = -(1e)\ (27.2\ V) = -27.2\ eV$$

وطاقة حركة الإلكترون KE هى نصف هذا المقدار :

$$KE = +13.6\ eV$$

أما **الطاقة الكلية** للإلكترون ، PE + KE فهى

$$KE + PE = -13.6\ eV$$

وعلى هذا يكون المقدار الإضافى لطاقة الحركة والمطلوب لتحرير الإلكترون هو +13.6 eV . وهذا المقدار هو ما نسميه **طاقة التأين** (أو طاقة الربط) للهيدروجين . ومما يذكر أنه حتى نموذج بوهر المفرط فى البساطة يقدم مقادير لهذه الطاقة ، متفقة بدقة مع القيم المعملية .

17-7 المكثفات

(أ)

(ب)

شكل 10-17:
تستقر الشحنات المتعاكسة والمتساوية على الوجهين الداخليين للوحى المكثف . لاحظ الرمز المستخدم للدلالة على المكثف فى (ب) .

لقد أشرنا كثيرًا إلى منظومة لوحين معدنيين مشحونين بشكل متضاد . وهذا فى الواقع هو أحد أشكال نبيطة (أداة) على قدر كبير من الأهمية العملية بالنسبة لتخزين الطاقة والشحنة الكهربيين ، كما سنرى فى فصول لاحقة . وتسمى هذه الأداة **مكثفًا** . وترى وهى متصلة ببطارية فى الشكل 10-17 . وقد ناقشنا فى القسم 4-17 كيف تنقل البطارية شحنات موجبة وسالبة إلى اللوحين كما فى الشكل 10-17 (أ) . ولا يظهر فى الشكل من اللوحين سوى حوافهما؛ إذ إن سطحيهما المستويين يواجه كل منهما الآخر . وسرعان ما تتحقق الظروف الكهروستاتيكية والتى يكون فيها فرق الجهد بين اللوحين مساويًا للقوة الدافعة الكهربية للبطارية ؛ حتى إذا فصلت البطارية بعد ذلك فإن اللوحين يظلان مشحونين إلى مستوى ذلك الجهد . وعلى هذا يكون المكثف أداة قادرة على **تخزين الشحنة** . والرمز المستخدم للدلالة على المكثف ، كما هو موضح بالشكل 10-17 (ب) هو —|⊢ .

سنقوم بالرمز إلى الشحنات على اللوحين بالحرفين $+q$ و $-q$. وسنفترض أن هذه الشحنات منثورة بانتظام فوق المساحة A للوحين ، ومعنى هذا أن كثافتى الشحنة على اللوحين هما $\sigma = q/A$ و $-q/A$. وقد رأينا فى الفصل السادس عشر أن المجال الكهربى بين اللوحين المشحونين هو :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{A\epsilon_0}$$

أما الجهد V بين اللوحين فيرتبط بالمجال الكهربى بالعلاقة :

$$V = Ed = \frac{d}{A\epsilon_0} q \qquad (17\text{-}7)$$

حيث d هى المسافة بين اللوحين . وهكذا نرى أن V تتناسب مع q ، وهى نتيجة عامة ، قابلة للتطبيق على أشكال أخرى للمكثفات بنفس الدرجة .



تصنع المكثفات بمختلف الأحجام لأداء عدد كبير من الوظائف فى الدوائر الكهربية .

السعة C للوحين هى النسبة بين الشحنة المختزنة على اللوحين والجهد بينهما:

$$C = \frac{q}{V} \qquad (17\text{-}8)$$

أى أن وحدات SI للسعة هى كولوم لكل فولت . وسنطلق على هذه الكمية المشتقة اسم فاراد (نسبة إلى الفيزيائى الانجليزى مايكل فاراداى) .

فاراد (F) واحد = كولوم واحد لكل فولت (C/V)

ويمكننا من المعادلة 7-17 أن نحدد سعة منظومة اللوحين المتوازيين :

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad \text{(لوحين متوازيين)} \qquad (17\text{-}9)$$

عليك إثبات أن هذه المعادلة تؤدى بالفعل إلى وحدات الفاراد .

وهناك نقطة مهمة جديرة بالملاحظة وهى أن السعة خاصية لأداة (نبيطة) خاصة . **وإذا عرفت أبعاد وشكل مكثف ما ، فإن سعته تكون قد تحددت* بغض النظر عن**

* سنرى فى القسم 9-17 أن المادة المحيطة بالسطحين المشحونين تؤثر أيضًا على السعة . وإذا شئنا الدقة والتحديد فإن المعادلة (9-17) تمثل لوحين متوازيين فى الفراغ .

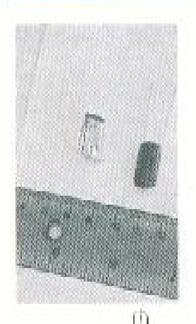
مقدار الشحنة المختزنة فيه . فبالنسبة للوحين المتوازيين مثلاً ، فإن C تتعين تمامًا بمساحة اللوحين والمسافة بينهما .

والفاراد كمية هائلة من السعة ولذلك فإن قيم C المتداولة فى الأجهزة العملية تكون عادة من رتبة μF أو أقل . وبالنسبة للوحين مساحة كل منهما $100\ cm^2$ مثلاً ، وتفصلهما مسافة مقدارها $1\ mm$ ، تكون السعة هى :

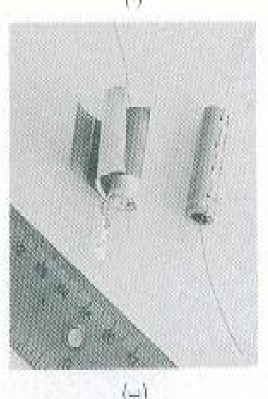
$$C = \frac{(8.85\times10^{-12}\ C^2/N.m^2)(100\times10^{-4}\ m^2)}{10^{-3}\ m}$$

$$= 8.85\times10^{-11}\ F = 88.5\ (pF)$$ بيكوفاراد أو

تحتوى معظم المكثفات ذات اللوحين المتوازيين ـ من الناحية العملية ـ على شريحة من مادة غير موصلة موضوعة بين اللوحين المعدنيين . وتسمح هذه الشريحة للوحين أن يوضعا بالقرب من بعضهما البعض دون خوف من تلامسهما بحيث تتحد الشحنات معًا . ويصنع الكثير من المكثفات المتاحة تجاريًا باستخدام رقيقتين معدنيتين إحداهما فوق الأخرى ووضع غشاء بلاستيكى رقيق بينهما ليمنع حدوث التلامس بينهما . ثم تطوى الطبقات الثلاث بإحكام لنحصل على أسطوانة يتم بعد ذلك تغليفها لتصبح سهلة التداول . والأداة بهذا الشكل هى بالضرورة مكثف متوازى اللوحين وإن كانت تبدو مختلفة تمامًا عن الرسم الموجود فى الشكل 10-17 . والمكثفات التى سعتها $0.10\ \mu F$، وهو الحجم الشائع لا تشغل حيزًا يزيد عن $1\ cm^3$ عندما تصنع بهذه الطريقة . ويبين الشكل 11-17 مكثفين شائعى الاستعمال.



(أ)



(ب)

شكل 11-17:
تعمل صفيحتان من رقيقة معدنية تفصلهما مادة عازلة كلوحين فى مكثف تجارى ولو تم لف الصفيحتين أو ثنيهما ليتخذا حجمًا مضغوطًا فإن المكثف ذى اللوحين المتوازيين يمكن اختزاله إلى أى حجم مناسب . ويرى بالشكل نوعان من المكثفات فى هيئتهما الأصلية وعند فكهما جزئيًا .

(أ) مكثف سعته 100 pF مما يستخدم فيه شريحة رقيقة من البلاستيك كعازل . (ب) مكثف إلكتروليتى سعته $740\ \mu F$ تستخدم فيه قشرة رقيقة من أحد الأكاسيد تغطى الرقيقة المعدنية وتعمل كعازل ويتم فصل الصفيحتين المعدنيتين بواسطة شريحة ورقيقة مشبعة بإلكتروليت رطب . وعلى الرغم من أن المكثفات الإلكتروليتية تتمتع بسعة كبيرة ، إلا أنها عادة لا تتحمل الجهود الكهربية المرتفعة .

مثال 8-17 :

ما هى سعة كرة معدنية منعزلة ونصف قطرها $R = 10\ cm$ ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يتسنى لموصل منعزل أن تكون له سعة ؟

الإجابة : إن كلمة « منعزل » تعنى أن الشحنات الأخرى تقع عمليًا على أبعاد لا نهائية منه ، وهذا هو نفس المبدأ ، الذى يتيح لنا أن نعرِّف الجهود المطلقة لشحنات نقطية أو كروية . فإذا كانت هناك شحنة مقدارها q فوق كرة ، فإنها تتسبب فى جهد مطلق V عند كل نقطة خارج الكرة . ويظل التعريف العام للسعة $C = q/V$ قائمًا فى جميع الحالات.

سؤال : لو كانت الكرة تحمل شحنة مقدارها q فما الجهد V الذى ينطبق على هذه المسألة ؟

الإجابة : إنك تود أن تحسب الفولطية (فرق الجهد) بين الكرة الموصلة واللانهاية ولهذا فإن V_{abc} عند سطح الكرة هو ما يستخدم .

سؤال : ما قيمة q/V_{abc} بالنسبة للكرة ؟

الإجابة : تنطبق المعادلة 6-17 بالنسبة لشحنات نقطية وكروية.

$V = kq/r = q/4\pi\epsilon_0 r$ طالما كان r عند سطح الكرة أو خارجه.

سؤال : وما الذى يتيحه لى ذلك عند حساب السعة C ؟

الإجابة : $C = q/V = q/(kq/R) = R/k = 4\pi\epsilon_0 R$

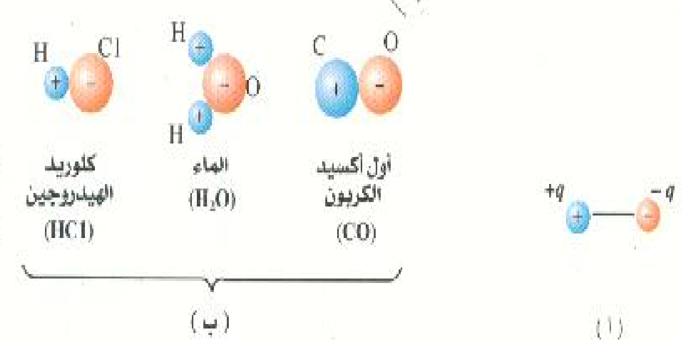
حيث استخدمنه العلاقة $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. أما R فهو نصف قطر الكرة .

الحل والمناقشة : لاحظ أن $C = 4\pi\epsilon_0 R$ وهو مقدار ثابت بالنسبة لكرة معينة . وهذا مثال آخر على أن السعة تعتمد فقط على أبعاد وهندسة الأجسام التى تختزن الشحنة . وإذا عوضنا بالأرقام فإن:

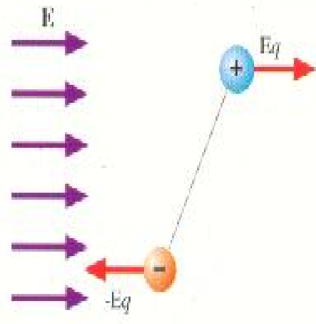
$$C = \frac{R}{k} = \frac{0.1\,\text{m}}{9\times10^9\ \text{N.m}^2/\text{C}^2} = 11.1\ \text{pF}$$

17-8 العـوازل

على الرغم من حقيقة أن غير الموصلات لا تحتوى على شحنًا حـرة ، إلا أن لـها تأثيرًا واضحًا على المجالات الكهربية التى توضع فيها . وهذه المواد التى يطلق عليـها عوازل فى هذه السـياق تميـل إلى الإلغـاء الجزئـى للمجـالات الكهربيـة التـى تنشـأ مـن الأجسام الشحونة . وسنرى الآن كيف تقوم هذه المواد بذلك .



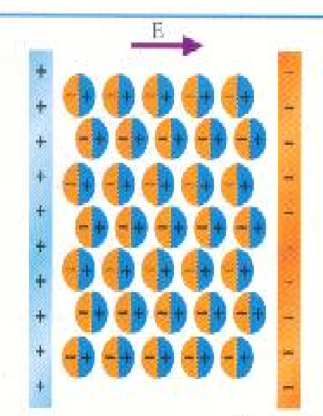
شكل 17-12: الجزيئات ثنائية القطب فى (ب) تتصـرف مثل ثنائى القطب فى (أ) .



شكل 17-13: يتسبب المجال الكهربى فى جعـل ثنـائى القطب يقع تحت تأثير عزم دوران يميل إلى النظام ثنائى القطب فى اتجاه المجال .

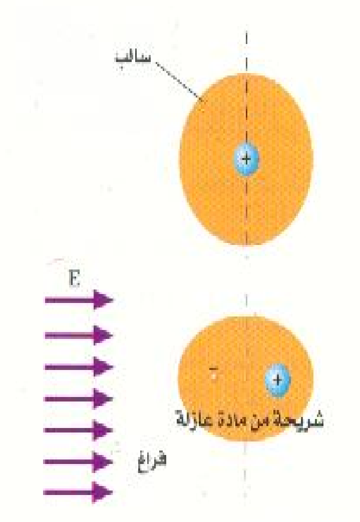
يمكننا تقسيم العوازل إلى مجموعتين ، الأولى تحتـوى علـى ثنائيـات قطب جزيئيـة والأخـرى لا تحتـوى . **وثنـائى القطب** يتكون مـن شحنتـين متساويتين فـى المقـدار ومختلفتين فى الإشارة وتفصلهما مسافة صغيرة كمـا يوضح ذلك الشكل 17-12 (أ) والكثير من الجزيئات تكون ـ على الرغم من أنها متعادلة كهربيًا (أى غير مشحونة) ـ على هيئـة ثنائيـات قطب ضئيلـة . ويوضح الشكـل 17-12 (ب) بعض أمثلـة تلـك الجزيئات . ومثل هذه الجزيئات تسمى جزيئات ثنائية القطب . وعندما يوضع أحـد هـذه الجزيئات فى مجال كهربى ، كمـا فـى الشكل 17-13 فإن طرفيه المشحونين بشحنات متعاكسـة يقعان تحت تأثير قوتين متساويتين فى المقدار ومتعاكستين فى الاتجاه ($\mathbf{E}q$ و $-\mathbf{E}q$) ويميـل العـزم النـاتج إلى التأثير على الجـزئ وجعلـه يصطـف باتجـاه المجـال الكهربى . ونتيجة لـهذا فإن الجزيئات ثنائية القطب الموجودة بين اللوحين المشحونـين تميل إلى أن تصطف فى صفوف كما يوضح الشكل 17-14 . ومن الناحية العملية ، تقوم الحركة الحرارية بالحيلولـة دون حـدوث تـراص كـامل للجزيئـات فـى اتجـاه المجـال الكهربى إلا إذا كان ذلك المجال قويًا للغاية .

الذرات وكثير من الجزيئات ليست فى العادة ثنائية القطب . وعلى الرغم من إنها تتألف من إلكترونات سالبة الشحنة ونوى موجب الشحنة إلا أن المراكز الفعالة لكلا النوعين من الشحنة تتطابق كما يوضح أعلى الشكل 15-17 . وهكذا تتصرف هذه الذرات والجزيئات كما لو كانت الشحنات السالبة والموجبة غير منفصلة عن بعضها البعض ولذا فإنها لا تمتلك ثنائى قطب دائم . ومع هذا ، فعندما توضع مثل هذه الذرة أو هذا الجزئ فى مجال كهربى ، كما هو موضح فى الجزء السفلى من الشكل 15-17 فإن الإلكترونات سالبة الشحنة تنجذب بشكل طفيف نحو اليسار أما النواة موجبة الشحنة فإنها تُدفع بشكل طفيف إلى اليمين . وتتسبب هذه الزحزحة الطفيفة للشحنات فى جعل الذرة (أو الجزئ) تصبح ثنائى قطب ، وعندئذ يقال أنها (أو أنه) قد **استقطبت (أو استقطب)** ، وأنها أصبحت تمتلك ثنائى قطب مستحث .



شكل 14-17:
تصطف ثنائيات القطب بامتداد خطوط المجال .

وهكذا نرى أن كل المواد العازلة ، إذا وضعت فى مجال كهربى ، فإن ذراتها تصبح ثنائيات قطب مصطفة فى اتجاه المجال كما فى الشكل 14-17 . لاحظ كيف أن اللوح الموجب يعمل على جعل الأطراف السالبة لثنائيات القطب تقترب منه بينما يجذب اللوح السالب الأطراف الموجبة . ولاحظ أيضًا فى الشكل 14-17 أن اصطفاف ثنائيات القطب فى صفوف يجعل طبقة من الشحنات الموجبة (هى الأطراف الموجبة لثنائيات القطب) تتواجد بالقرب من اللوح الذى إلى اليمين . وبالمثل فهناك طبقة من الشحنات السالبة بالقرب من اللوح الذى إلى اليسار . وعند وضع شريحة من مادة عازلة بين اللوحين كما فى الشكل 16-17 فإن ترتيب ثنائيات القطب يجعل الشحنات تظهر على وجهى الشريحة . وليست هذه الشحنات سوى الأطراف المشحونة لثنائيات القطب البادية عند سطحى العازل . وسوف نشير إلى هذا النوع من الشحنات على أنه شحنة الاستقطاب المستحث أو الشحنة المقيدة . وتعكس التسمية الأخيرة حقيقة أن هذه الشحنة مقيدة إلى الذرات والجزيئات داخل العازل ؛ أى أنها ليست حرة لأن تتحرك بعيدًا عن الذرة أو الجزء الذى تنتمى إليه .



شكل 15-17:
(أ) فى الظروف العادية فإن الإلكترونات السالبة ـ فى ذرة أو جزئ غير قطبية ـ تتخذ توزيعًا متماثلاً للشحنة حول النواة الموجبة . (ب) وتوزيع الشحنة الإلكترونية يتزحزح بعيدًا عن النواة وفى اتجاه يعاكس اتجاه المجال E الذى تتواجد فيه الذرات . (لماذا ؟) وهذا ما يجعل الذرة أو الجزئ يصبح ثنائى قطب مستحث .

ويختلف مقدار الشحنة المقيدة التى يمكن أن تستحث عند سطح جسم ما من مادة إلى أخرى ؛ فنحن نعلم ، مثلاً ، أن باطن موصل ما لابد وأن يكون منطقة خالية من المجال الكهربى . ولهذا فلو أدخلت شريحة معدنية (أو موصلة) بين اللوحين فإن الشحنة السطحية المستحثة لابد وأن تتساوى مع الشحنة على اللوحين ؛ وهذا يلغى تمامًا المجال داخل الموصل ؛ كما هو موضح فى الشكل 17-17 . لاحظ أن كل خطوط المجال تنتهى عند السطح السالب للموصل وتبدأ مرة أخرى عند السطح الموجب ؛ وأنه لا توجد خطوط للمجال داخل الموصل.

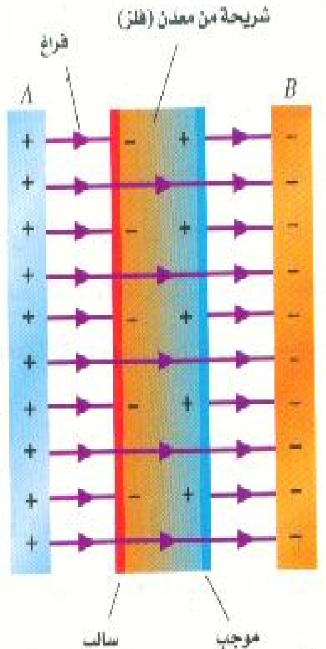
أما بالنسبة للعوازل فالشحنة المستحثة تكون أقل من الشحنة الموجودة على اللوحين ؛ ولهذا فلن تنتهى كل خطوط المجال على شحنات عند سطح العازل ، لأن بعضها يتخلل المادة العازلة كما هو موضح فى الشكل 16-17 . **والنتيجة العامة هى أن المجال الكهربى داخل العازل يكون أقل من المجال الخارجى المطبق عليه** . وكلما كان من السهل على المادة أن تستقطب ، كلما زاد الفرق بين المجال الداخلى والمجال الخارجى .

وتوصف قدرة العازل على خفض شدة المجال الكهربى بكمية تسمى **ثابت العـزل K** له ويمكن تعريفه بالرجوع إلى الشكل 16-17 :

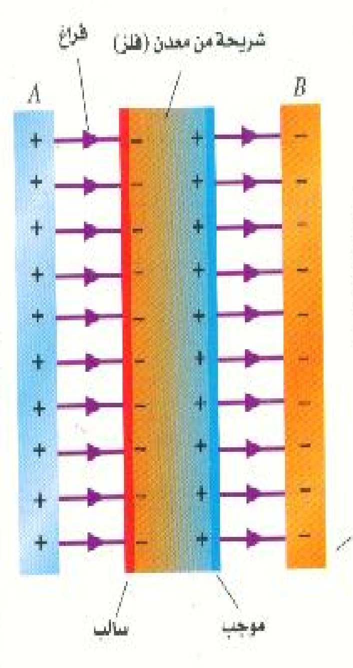
$$K \text{ ثابت العزل} = \frac{\text{المجال الكهربى فى الفراغ}}{\text{المجال الكهربى فى العازل}}$$

أى أن المجال الكهربى داخل عازل ما ليس سوى $(1/K)$ من قيمته خارجه .

ويتضمن الجدول 1-17 قيمًا نموذجية لثوابت العزل لبعض المواد . لاحظ أن الفراغ لا يغير المجال مطلقًا ولذا كان ثابت عزله يساوى الوحدة . ولما كان الـهواء لا يحتـوى إلا على عدد قليل من الجزيئات فى وحدة الحجوم ، فإن ثابت عزله لا يختلف إلا اختلافًا طفيفًا عن ذلك الذى للفراغ . وبالنسبة لمعظم الجوامد فإن K يقع فى المـدى مـن 2 إلى 10 . وعلى الرغم من أننا لا نعتبر الفلزات (المعادن) من العوازل إلا أن عليك أن تكون قـادرًا على إثبات أن ثابت عزل فلز ما لا نهائى.



شكل 16-17:
يستحث المجال الكهربى شحنات مقيدة على سطح العازل ، وهذه الشحنات هى التى تجعل المجال أقل داخل العازل عنها خارجه .



شكل 17-17:
عندما يستبدل بشريحة العازل فى الشكل 16-17 ، لوح معدنى (فلزى) ، فإن ما يكفى من الشحنات يستحث على سطحى المعدن لكى يخفض المجال داخل المعدن إلى الصفر .

جدول 1-17 :
ثوابت العزل (عند 20°C)

المادة	K
الفراغ	1.00000
الـهواء	1.006
البارافين	2.1
زيت البترول	2.2
البنزين	2.29
البولى‌ستيرين	2.6
الثلج (عند −5°C)	2.9
الميكا	6
الأسيتون	27
الكحول الميثيلى	38
الماء	81
الفلزات (المعادن)	∞

17-9 تأثيرات العـوازل

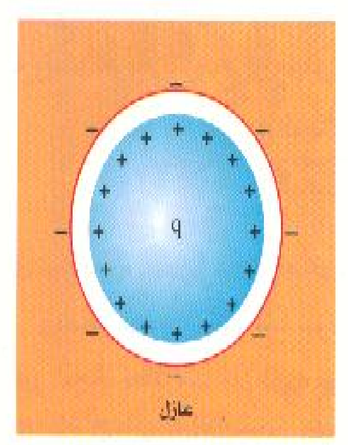
يتغير قانون كولوم عندما تغمر الشحنات داخل عـازل ؛ ولكـى نتعـرف علـى سبب حدوث ذلك علينا الرجوع إلى الشكل 18-17 ؛ حيث نرى كرة شحنتها q مغمورة داخل عـازل يمتد لمسافات بعيـدة فـى جميـع الاتجاهـات - أو بمعنـى آخـر - عـازل لا نهائى بالضرورة . لاحظ كيف تستحث الكرة شحنة على سطح العـازل المجـاور لـها . وهذه الشحنـة المستحثة تلغـى فعليًا بعـض الشحنـة الموجـودة علـى الكـرة . . وهكـذا ينخفض المجال الكهربى داخل العازل من القيمة $E = (kq/r^2)$ التـى تنطبـق فـى حالـة الفراغ . ويخفض العازل من قيمة المجال بمعامل مقداره $(1/K)$ ، أى أن المجـال داخـل العازل يكون :

$$E = k\frac{q}{Kr^2} \quad \text{(شحنة نقطية)} \quad (17\text{–}10)$$

وهذا هو المجال الكهربى لشحنة نقطية مغمورة داخل عازل .

افترض الآن أن شحنتين هما q_1 و q_2 تفصلهما مسافة مقدارها r قد غمرتا داخل عازل لا نهائى . إنّ المجال الخاص بالشحنة q_1 عند موقع q_2 يعطى بالمعادلة 10–17 عند وضع q_1 مكان q . ويتسبب هذا المجال فى وجود قوة مقدارها $\mathbf{E}q_2$ تؤثر على q_2 ، وهكذا فإن القوة المؤثرة على q_2 بسبب وجود q_1 هى :

$$F = k\frac{q_1 q_2}{Kr^2} \quad \text{(قانون كولوم)} \quad (17\text{–}11)$$



شكل 18–17:
كرة مشحونة داخل عازل لا نهائى . لماذا تنخفض قيمة المجال الكهربى فى وجود العازل ؟

وهذا هو قانون كولوم بالنسبة لشحنات نقطية داخل عازل لا نهائى.

وحيث أن العازل يؤثر بشدة على القوى بين الشحنات ، لذا كانت التفاعلات الكيميائية والبيولوجية شديدة الاعتماد على المذيبات . فأيونان ، مثلاً ، فى محلول ما يؤثران بقوى تتمثل فى المعادلة (11–17) على أحدهما الآخر . والماء له $K = 81$ ولهذا فإن القوة بين الأيونيين تكون أقل كثيرًا فى الماء عنها فى سائل آخر كالبنزين مثلاً ، الذى ثابت عزله $K = 2.3$ نتيجة لهذا فأيونا الصوديوم Na^+ والكلور Cl^- المكونان لكلوريد الصوديوم ، يمكن أن يهربا من بعضهما فى الماء بينما لا يستطيعان ذلك فى البنزين . ومن ثم فإن الماء يذيب $NaCl$ أما البنزين فلا يستطيع . وهناك العديد من المواقف المماثلة فى منظومات كيميائية وبيولوجية حيث يقوم ثابت العزل للمذيب بدور حاسم فى التفاعلات الكيميائية.

إن معظم المكثفات مصنوعة بحيث توجد مادة عازلة بين ألواحها كما ذكر من قبل فى القسم 7–17 . ولا يزيد هذا من متانة هيكلها فحسب **وإنما يرفع أيضًا من سعتها ، كما سنرى بعد قليل.**

سنبدأ بشحن مكثف متوازى اللوحين بالشحنات $+q$ و $-q$ على اللوحين . وسنفترض أن هناك فراغًا فقط بين اللوحين ، وأن C_{vac} هى سعة المكثف تحت هذه الظروف . وفرق الجهد أو الفولطية بين اللوحين هى $V_{vac} = q/C_{vac}$ دعنا الآن نُدخل شريحة عازل بحيث تملأ الحيز بين اللوحين تمامًا ؛ وحتى لو تلامست أسطح اللوحين مع شريحة العازل فإن الشحنات لا يمكن أن تتحرك عبر الحدود بين المادتين . والمجال بين اللوحين قد انخفض الآن بمقدار $(1/K)$ أى $\mathrm{E} = E_{vac}/K$ وهذا بدوره يخفض فرق الجهد بين اللوحين :

$$V = Ed = \frac{E_{vac}}{K}d = \frac{V_{vac}}{K}$$

ولكن الشحنة الموجودة على اللوحين لا تتغير عند إدخال العازل . ولهذا فإن نسبة الشحنة إلى فرق الجهد أو السعة تكون الآن :

$$C = \frac{q}{V} = \frac{q}{V_{vac}/K} = KC_{vac} \qquad (17\text{-}12)$$

وهكذا فإن نفس اللوحين ، بنفس المسافة التى تفصلهما ، يصبحان قادرين على اختزان المزيد من الشحنة لكل فولت عندما يوجد عازل بينهما .

وهناك وسيلة بسيطة لقياس ثابت العزل لمادة ما وذلك بقياس فرق الجهد عبر اللوحين المشحونين فى الفراغ ثم يعاد القياس بعد ملء الحيز بينهما بالعازل . والنسبة بين هاتين القيمتين لفرق الجهد هى ثابت العزل K :

$$\frac{V_{vac}}{V_{diel}} = K$$

مثال 17-9 :

إذا كانت مساحة السطح فى مكثف متوازى اللوحين هى $20\ cm^2$ وتفصل بين اللوحين مسافة مقدارها 0.4 mm وقد وصل اللوحان ببطارية قوتها الدافعة 120 V . ما مقدار الشحنة التى تسرى إلى اللوحين ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف ترتبط شحنة اللوح بالفولطية ومساحة اللوح والمسافة بين اللوحين ؟

الإجابة : مساحة اللوحين والمسافة التى تفصلهما هى التى تحدد سعة اللوحين (المعادلة 17-9) . وإذا عرفت السعة فإن شحنة اللوح تتحدد من التعريف :

$$C = q/V$$

سؤال : ما هو فرق الجهد (الفولطية) التى يكتسبها اللوحان ؟

الإجابة : ستسرى الشحنة من البطارية إلى أن يصبح فرق الجهد بين اللوحين مساويًا لفولطية البطارية.

الحل والمناقشة : إن مقدار السعة هو:

$$C = \frac{(8.85\times10^{-12}\ C^2/N.m^2)(20\times10^{-4}\ m^2)}{(0.4\times10^{-3}\ m)}$$

$$= 44.3\ pF$$

والشحنة التى ستسرى إلى اللوحين هى

$$q = VC = (120\ V)(44.3\times10^{-12}\ F) = 5.32\times10^{-9}\ C$$

تأكد من استيعابك للوحدات المستخدمة .

مثال 17-10 :

لو أن اللوحين المذكورين فى المثال السابق فصلا عن البطارية ثم غمرا فى الماء ، فأى الكميات C ، V ، q سوف تتغير ؟ وما مقدار التغير ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو تأثير الانفصال عن البطارية ؟

الإجابة : بدون البطارية لن يعود هناك مصدر للشحنة . والشحنة التى وضعت فى الأصل على اللوحين ستظل حبيسة عليهما ، حيث لا تستطيع المغادرة كما لا يمكن أن يضاف المزيد من الشحنات . أى أن q لابد أن تظل هى نفسها .

سؤال : ماذا يحدث لقيمة C عندما يغمر اللوحان ؟

الإجابة : $C_{diel} = K\,C_{vac}$

سؤال : ماذا يحدث لفرق الجهد بين اللوحين ؟

الإجابة : فى غياب البطارية ، فإن فرق الجهد يمكن (بل ويجب) أن يتغير:

$$V_{diel} = \frac{V_{vac}}{K}$$

الحل والمناقشة : ثابت عزل الماء هو $K = 81$ ولذا فإن النتيجة البسيطة التالية ستكون لدينا:

$$C_{diel} = 81\,C_{vac} = (81)(44.3 \times 10^{-12}\ \text{F}) = 3.59\ \text{nF}$$

$$V_{diel} = \frac{120\ \text{V}}{81} = 1.48\ \text{V}$$

وحيث أنك قد قررت أن الشحنة لابد وأن تبقى ثابتة ، فمعنى هذا أن حاصل الضرب $VC\ (=q)$ لابد وأن يبقى ثابتًا . واستقطاب الماء سوف يلغى المجال الواقع بين اللوحين فيما عدا $1.2 = 120/1.48$ فى المائة منه .

مثال 17-11

لو أن اللوحين المذكورين فى المثال 10-17 غمرا فى الماء مع استمرار توصيل البطارية باللوحين ، فكيف يمكن أن تختلف هذه النتائج ؟

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن أن تتغير الشحنة مع وجود البطارية متصلة ؟

الإجابة : نعم . إن البطارية يمكن أن تكون مصدرًا للشحنات طالما ظلت متصلة.

سؤال : ما هى قيمة الفولطية الواجب تواجدها عندما تظل البطارية متصلة ؟

الإجابة : ستظل البطارية توفر الشحنات للوحين إلى أن يصبح فرق الجهد عبرهما مساويًا لفولطية البطارية : $V_{diel} = V_{vac} = V_{battery}$.

سؤال : وماذا سيحدث للسعة ؟

الإجابة : إن السعة مستقلة عن مقدار الشحنة أو فرق الجهد . إذ إنها خاصية للمواد والأبعاد الهندسية للوحين ، ولهذا سنحصل مرة أخرى على:

$$C_{diel} = K\,C_{vac}$$

الحل والمناقشة : إن المقدار الذى سيجبر على البقاء كما هـو سيكون الفولطيـة 120 V عبر اللوحين . أما C فستزيد حتى تصبح 3.29 nF . والشحنة ستضبط بحيث :

$$q_{diel} = C_{diel}\,V = (3.59 \times 10^{-9}\ F)(120\ V)$$

$$= 4.31 \times 10^{-7}\ C$$

تذكر أن الشحنة الأصلية كانت 5.32 nC ، ولهذا فإن كمية إضافية مقدارها 4.26×10^{-7} C لابد أن تتوفر بواسطة البطارية التى لا زالت متصلة .

17-10 المكثفات المتصلة معًا على التوالى وعلى التوازى

سنلتقى فى كثير من التطبيقات فيما بعد بالمكثفات المتصلة معًا بتنويعات مختلفة وسنود أن نعرف مقادير السعات الكلية الفعالة لهذه التنويعات.

سنقوم أولاً بتوصيل ثلاثة مكثفات ببطارية فولطيتها V كما هو موضح فى الشكل 17-19 (أ) . وهذا ما يطلق عليه التوصيل على التوازى . كيف إذن يتم جمع السعات المنفردة ؟ أو بتعبير آخر ما هى السعة الوحيدة C التى تكافئ المجموعة المتصلة على التوازى ؟

لاحظ أن الألواح الثلاثة إلى اليسار متصلة معًا بواسطة سلك يصل إلى الطرف الموجب للبطارية ؛ ولهذا لابد أن تكون الألواح الثلاثة كلها عند نفس الجهد . وبالمثل ، فإن ألواح المكثف إلى اليمين لابد وأن يكون لها نفس الجهد مثل الطرف السالب للبطارية . ونستطيع ، إذن أن نخرج بالنتيجة التالية:

إن الجهد عبر كل المكثفات المتصلة على التوازى لابد أن يكون نفس الجهد .

وفى الحالة الموضحة فى الشكل 17-19 (أ) ، فإن الجهد عبر كل مكثف V سيكون هو نفسه فولطية البطارية .

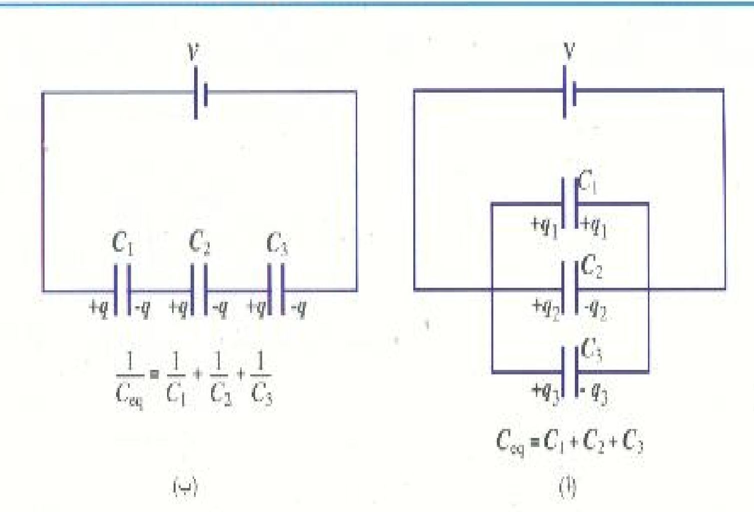
وتعطى شحنة كل مكثف من تعريف السعة .

$$q_1 = C_1V \qquad q_2 = C_2V \qquad q_3 = C_3V$$

والشحنة الكلية على الألواح اليسرى هى . $q_{tot} = q_1 + q_2 + q_3$ أما الشحنة الكلية على الألواح اليمنى فهى نفس الشحنة ولكن بإشارة سالبة . والمكثف الذى يكافئ الثلاثة الموضحة فى الشكل 17-19 سوف يختزن شحنة مقدارها q_{tot} عند فولطية مقدارها V :

$$C_{eq} = \frac{q_{tot}}{V} = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{V} = \frac{q_1}{V} + \frac{q_2}{V} + \frac{q_3}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

وقد استعملنا هنا حقيقة أن $\frac{q_1}{V} = C_1$ وبالمثل بالنسبة للمكثفين C_2 و C_3 .



شكل 19-17:
(أ) تكتسب المكثفات المتصلة على التوازى مع فولطية مقدارها V ، شحنات مختلفة ، وإن كانت جميعها تكتسب نفس الفولطية . والسعة المكافئة (الكلية) لهذه المجموعة هى مجموع السعات المنفردة .
(ب) المكثفات المتصلة على التوالى مع فولطية V تكتسب كلها نفس الشحنة . تضاف مقلوبات السعات المنفردة لتعطى مقلوب السعة المكافئة (الكلية) لهذه المجموعة .

ونستطيع أن نعمم هذه النتيجة بالنسبة لعدد n **من المكثفات المتصلة على التوازى** .

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots\ldots + C_n \qquad (17-13)$$

ويوضح الشكل 19-17 (ب) ثلاثة مكثفات متصلة معًا من أطرافها . ويطلق على هذا النوع من التوصيل اسم **التوصيل على التوالى** . وسنقوم بإيجاد السعة الكلية المكافئة لهذه المجموعة .

عند توصيل هذه المجموعة ببطارية ذات فولطية مقدارها V كما هو موضح فإن اللوح الأيسر للمكثف C_1 سيكون عند نفس جهد الطرف الموجب للبطارية ، والطرف الأيمن للمكثف C_3 سيكون عند نفس جهد الطرف السالب . وعلى هذا تكون الفولطية V هى الجهد عبر المجموعة المتصلة معًا على التوالى بأكملها . ويكتسب اللوحان المذكوران الشحنات $+q$ و $-q$ على الترتيب . وهذا ما يجعل الشحنات $+q$ و $-q$ تستحث على الألواح المتبقية للمكثفات كما هو موضح فى الشكل 19-17 (ب) . ولكى تتأكد من صحة هذا ؛ لاحظ أنه فى غياب أى اتصال خارجى ، فلن توجد شحنة **صافية** على الألواح الداخلية . واللوح الأيمن للمكثف C_1 واللوح الأيسر للمكثف C_2 يكونان معًا موصلا منفردًا متعادلاً عندما يتصلان . ويقال نفس الشىء عن اللوحين الداخليين الآخرين . أى أن كل ما يمكن للبطارية عمله هو أن تستحث **فصلاً** للشحنات بين هذه الألواح . وعلى هذا نستطيع أن نستخرج النتيجة التالية حول المكثفات المتصلة معًا على التوالى :

يحمل كل مكثف متصل ببطارية ضمن مجموعة من المكثفات المتصلة على التوالى نفس كمية الشحنة .

وحيث أن الشحنات متساوية ، لذا فالمكثفات المنفردة لابد وأن يكون عبرها فولطيات (فروق جهد) مختلفة :

$$V_1 = \frac{q}{C_1} \qquad V_2 = \frac{q}{C_2} \qquad V_3 = \frac{q}{C_3}$$

وعلاوة على ذلك فإن الفولطيات الثلاث تعطى حين تجمع إلى بعضها الفولطية الكلية V :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

والمكثف المنفرد المكافئ سيكتسب الشحنة q من البطارية ذات الفولطية V ومن ثم

$V = q/C_{eq}$. وبمساواة هذين التعبيرين عن V نجد أن

$$V = \frac{q}{C_{eq}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

وعند اختصار المقدار q من طرفي المعادلـة وتعميم النتيجـة علـى عـدد n **من المكثفات المتصلة على التوالى فإن :**

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots\ldots + \frac{1}{C_n} \qquad (17\text{-}14)$$

وبعد أن تجمع المقلوبات ، تذكر أن تقلب المجموع حتى تحصل علـى C_{eq} . وهـذا هـو الخطأ الوحيد الأكثر شيوعًا فى هذا النوع من الحساب . وفيما يلي اختبار مفيد للإجابة فى حالة التوصيل على التوالى :

لابد وأن تكون C_{eq} أصغر من أي من المكثفات المنفردة في المجموعة المتصلة معًا على التوالى .

مثال توضيحى 17-4

افترض أن لديك ثلاثة مكثفات $C_1 = 3\ nF$ و $C_2 = 4\ nF$ و $C_3 = 6\ nF$. احسب السـعة المكافئة إذا وصلت هذه المكثفات (أ) على التوازى و (ب) على التوالى .

استدلال منطقى : إن المجموعة المتصلة على التوازى سهلة جدًا :

$$C_{par} = C_1 + C_2 + C_3 = 3\ nF + 4\ nF + 6\ n = 13\ nF$$

أما على التوالى فسوف تجمع المقلوبات :

$$\frac{1}{C_{ser}} = \frac{1}{3nF} + \frac{1}{4nF} + \frac{1}{6nF}$$

أوجد مقامًا مشتركًا وهو 12 nF مثلاً ،

$$\frac{1}{C_{ser}} = \frac{4+3+2}{12nF} = \frac{9}{12nF}$$

لاحظ إنه يجب قلب هذا المقدار :

$$C_{ser} = \frac{12\ nF}{9} = 1.33\ nF$$

وهذه النتيجة هي بالفعل سعة أصغر من أصغر قيمة منفردة أى $(1.33 < 2)$ ■ .

17-11 الطاقة المختزنة في مكثف مشحون

يختزن المكثف المشحون طاقة وضع كهربية بداخله . ونحن نعرف حقيقة هذا لأن إحدى شحنتيه تكتسب حين تنطلق من أحد لوحيه ، طاقة حركة عند انتقالـها إلى اللوح الآخـر . ونستطيع أن نحصل على مقدار الطاقة المختزنة فى المكثف المشحون وذلك بحساب الشغـل الذي على البطارية بذله لتوصيل الشحنة إلى اللوحين .



إن الطاقة التى يمكن اختزانها فى مكثف كبير مشحون تصبح واضحة بشكل مثير (درامائيكى) عندما يتم توصيل طرفى المكثف (قصرهما) ببعضهما البعض .

سننظر إلى عملية الشحن على أنها تلك التى تكون فيها الشحنة النهائية q قد تمت على هيئة أجزاء صغيرة من الشحنة Δq تم توصيلها إلى اللوحين وعند البداية لم يكن هناك فرق للجهد عبر اللوحين غير المشحونين ولذا تصل الدفعة الأولى من Δq دون بذل أى شغل . أما Δq التالية فتحتاج إلى بذل شغل عليها نظرًا لتكون فولطية $\Delta q/C$ عبر اللوحين . وهكذا فإن الدفعات المتتالية من Δq ستتطلب المزيد من الشغل لأن فرق الجهد يأخذ فى الزيادة باطراد نتيجة تراكم الشحنات على اللوحين . وتحتاج آخر دفعة من Δq إلى شغل مقداره ΔqV ، حيث V هو فرق الجهد النهائى عبر اللوحين المشحونين تمامًا . وهذا يكون الشغل الكلى المبذول مكافئًا لتوصيل الشحنة بأكملها فى وجود القيمة المتوسطة للفولطية (فرق الجهد) خلال عملية الشحن . وهذه القيمة المتوسطة هى $\frac{1}{2}V$ ، ومن ثم تكون الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون هى :

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}qV = \frac{\frac{1}{2}q^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 \qquad (17\text{–}15)$$

حيث استخدمنا تعريف السعة $C = q/V$.

17–12 الطاقة المختزنة فى مجال كهربى

لقد عرفنا فى القسم السابق أن الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون هى $\frac{1}{2}CV^2$ ، حيث V هى الفولطية الواقعة عبر المكثف الذى سعته C . وعلى الرغم من أنه من غير الضرورى أن نحدد بدقة كيف وأين تختزن هذه الطاقة ، إلا أنه يكون من المناسب أحيانًا أن نفكر فى الأمر على أن الطاقة تختزن فى المجال الكهربى القائم بين لوحى المكثف . وبوجود هذه الخلفية فى الأذهان فقد يكون طيبًا أن نعبر عن معادلة الطاقة المختزنة بدلالة المجال الكهربى E بين اللوحين . ونستطيع عمل هذا عند تذكر أنه بالنسبة للمكثف متوازى اللوحين فإن ، $V = Ed$ ، حيث d هى المسافة التى تفصل بين اللوحين .

وعلى هذا فإن الطاقة المختزنة فى مكثف متوازى اللوحين تصبح :

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}CE^2d^2$$

على أنه من المعادلة (17–7) ، تكون سعة المكثف ذى اللوحين المتوازيين $C = \epsilon_0 A/d$ ، حيث A هى مساحة اللوح ، وذلك عندما يكون هناك فراغ بين اللوحين ؛ أما إذا كان ممتلئًا بعازل ذى ثابت عزل مقداره K فإن المعادلة تصبح $C = K\epsilon_0 A/d$.

وبالتعويض عن قيمة C هذه فى معادلة الطاقة نصل إلى :

$$\text{الطاقة} = (\frac{1}{2}K\epsilon_0 E^2)(Ad)$$

يلاحظ أن المقدار (Ad) هو حجم الحيز بين لوحى المكثف ـ أو بتعبير آخر : الحجم الذى يكون فيه المجال الكهربى ثابتًا . عند قسمة طرفى المعادلة على الحجم فإننا

نحصل على تعبير للطاقة فى وحدة الحجوم ، أى الطاقة التى نتصور أنها مختزنة فى وحدة الحجوم من تلك المنطقة التى يكون المجال الكهربى فيها هو E :

(17-16) كثافة الطاقة = الطاقة فى وحدة الحجوم = ($\frac{1}{2} K\epsilon_0 E^2$)

لاحظ أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم من الفضاء تتناسب مع مربع شدة المجال الكهربى . ومن المناسب عادة أن نستخدم المعادلة 16-17 عندما ننسب الطاقة إلى مجال كهربى . وعلى الرغم من أن هذا التعبير قد تم اشتقاقه بالنسبة لحالة خاصة جدًا ؛ إلا إنه قد ثبت فى كتب أكثر تقدمًا أن صلاحيته عامة .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) فرق الجهد ، (ب) الفولت ، (جـ) خطوط تساوى الجهد وأسطح وحجوم تساوى الجهد ، (د) القوة الدافعة الكهربية (emf) ، (هـ) الإلكترون فولت ، (و) الجهد المطلق ، (ز) المكثف ، (ح) السعة ، (ط) الفاراد ، (ى) العازل ، (ك) ثنائى القطب ، (ل) التوصيل على التوالى وعلى التوازى .

2 أن تحسب فرق الجهد بين نقطتين عندما تُعطى الشغل المبذول فى حمل شحنة q من نقطة إلى الأخرى (أو العكس) .

3 أن تحسب فرق الجهد بين أى نقطتين فى منطقة يوجد بها مجال كهربى منتظم معروف .

4 أن تخطط متساويات الجهد وخطوط المجال فى مواقف بسيطة .

5 أن تستخدم العلاقة $W = qV_{AB}$ فى مواقف محددة وبسيطة .

6 أن تحسب التغير فى الطاقة بالإلكترون فولت لجسيم معروف الشحنة يتحرك فى فرق جهد معروف . وأن تحول الطاقة من وحدات الإلكترون فولت إلى الجول .

7 أن تحسب الجهد المطلق فى نقطة ما ، الناشئ عن عدة شحنات نقطية محددة موجودة بجوار تلك النقطة .

8 أن تحسب التغير فى طاقة حركة جسيم مشحون بسبب حركته خلال فرق معين للجهد . ولو أعطيت إما مقدار السرعة الابتدائية أو النهائية أن تجد المقدار الآخر .

9 أن تحسب سعة لوحين متوازيين ، وكرة منعزلة باستخدام أبعادها وأن تذكر العلاقة التى تربط بين q ، V ، C .

10 أن تشرح السبب فى أن بعض السوائل أو الجوامد لها ثوابت عزل كبيرة والبعض الآخر له ثوابت عزل صغيرة .

11 أن تحسب الطاقة المختزنة فى مكثف معين مشحون حتى فرق جهد معروف .

12 أن تحسب تأثير العوازل على السعة ، والفولطية ، والمجال الكهربى .

13 أن تحسب السعة المكافئة لمكثفات متصلة على التوازى وأخرى متصلة على التوالى .

14 أن تحسب الطاقة فى وحدة الحجوم فى مجال كهربى .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدة الجهد الكهربى (V)

1 volt (V) = 1 J/C

وحدة الإلكترون فولت للطاقة (eV)

$$1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ J}$$

وحدة السعة (F)

$$1\text{ farad }(F) = 1\text{ C/V}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الجهد الكهربى (V) وطاقة الوضع

يعْرف الفرق في الجهد الكهربى (الفولطية) بيـن نقطتين A و B على أنه الفرق فـى طاقة وضع شحنة **موجبة** مقسومًا على تلك الشحنة :

$$\Delta V = V_{AB} = V_B - V_A = \frac{\text{PE}_B - \text{PE}_A}{q}$$

خلاصة :

1 فرق الجهد بين نقطتين فى منطقة بها مجال كهربى ثابت هو ببساطة

$$V_{AB} = Ed$$

حيث d هى المسافة بين A و B مقاسة على **امتداد E** .

2 **يتناقص** الجهد الكهربى فى اتجاه E .

3 وحدة SI البديلة للمجال الكهربى هو volt/meter :

$$1\text{ N/C} = 1\text{ V/m}$$

4 « تسقط » شحنة موجبة حرة من منطقة مرتفعة الجهد إلى أخرى منخفضة الجهد . أما الشحنـات السـالبة فإنـها « تسـقط » من مناطق منخفضة الجهد إلى مناطق جهدها أعلى . وفى كلتا الحالتين **تنخفض طاقة** وضع الشحنات الحرة .

5 يكون الشغل المطلوب لتحريك شحنة q خلال فرق للجهد مقداره V_{AB} هو .

$$W = \Delta\text{PE} = q\,V_{AB}$$

وتظهر الإشارة الصحيحة للكمية W إذا روعيت الإشارات الصحيحة لكل من q و V_{AB} .

6 تسمى الخطوط أو الأسطح ذات القيمة الثابتة للجهد **متساويات الجهد** . وتكون متساويات الجهد هذه متعامدة فى كل موقع مع خطوط المجال الكهربى .

7 جميع نقط الموصل تكون متساوية الجهد تحت الظروف الكهروستاتيكية .

الجهد المطلق لشحنات نقطية أو كروية .

يعتبر اتخاذ نقطة يكون الجهد فيها صفرًا أمرًا اختياريًا .

وبالنسبة للشحنات ذات التماثل الكروى (بما فى ذلك الشحنات النقطية) يكون اعتبار النقطة التى عندمـا $V = 0$ حيـث $r = \infty$ ملائمًا ، ومن ثم يُعطى الجهد المطلق لمثل هذه الشحنة Q بالعلاقة .

$$V(r) = \frac{kQ}{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

خلاصة :

1 إذا أُعطيت أبعاد وشكل المكثف فإن سعته تحدد مباشرة .

2 تشير القيمة الكبيرة للسعة إلى أن الأداة قادرة على اختزان كميات كبيرة من الشحنة من غير تراكم فولطية (فرق جهد) كبيرة . **أما القيم الصغيرة للسعة فتشير إلى فرق جهد كبير مع وجود كميات صغيرة نسبيًا للشحنات المختزنة .**

3 يعتبر المكثف ذو اللوحين المتوازيين ، مساحة سطح كل منها A وتفصلهما مسافة d هو أكثر المكثفات شيوعًا . وسعة هذا المكثف هي :

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

تكون سعة كرة منعزلة نصف قطرها R هي : $C = 4\pi\epsilon_0 r$

العوازل

غير الموصلات ، المسماة عوازل ، تستطيع تغيير المجال بين لوحى مكثف إذا وجدت بين اللوحين ، بسبب استقطاب جزيئاته . وينشأ عن هذا خفض جزئى لشدة المجال عن القيمة التى كان عليها فى الفراغ . والمدى الذى يستطيع العازل أن يخفض إليه المجال يتميز بثابت العزل K لذلك العازل ويعرف بالعلاقة :

$$K = \frac{\text{المجال فى الفراغ}}{\text{المجال فى العازل}}$$

خلاصة :

1 تكون قيمة K مساوية أو أكبر من الواحد .

2 المواد التى يسهل استقطابها يكون لها عادة قيمًا أكبر لثابت العزل .

3 فى كل المعادلات المحتوية على k أو ϵ_0 فإن وجود العازل الذى يملأ الحيز يمكن أخذه فى الاعتبار إذا استعملنا k/K أو $K\epsilon_0$ على الترتيب .

4 تتلخص النتائج المذكورة آنفًا فى أن V و E ينخفضان فى وجود عازل ما بمعامل مقداره $1/K$ ، أما C فإنها تزداد بمعامل مقداره K .

المكثفات المتصلة على التوالى والتوازى

تكون السعة الكلية المكافئة لعدد n من المكثفات المتصلة على التوازى هى :

$$C_{par} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots\ldots + C_n$$

أما السعة الكلية المكافئة لعدد n من المكثفات المتصلة على التوالى هى

$$\frac{1}{C_{ser}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots\ldots + \frac{1}{C_n}$$

خلاصة :

1 كل مكثف فى مجموعة متصلة على التوازى يكون له نفس فرق الجهد بين طرفيه ، ويحمل كل مكثف شحنة مختلفة (إلا إذا كانت لها جميعًا نفس السعة C) .

2 يحمل كل مكثف فى التوصيل على التوالى نفس الشحنة . ويكون لكل منها فرق جهد مختلف عبر طرفيه (إلا إذا كانت لها جميعًا نفس السعة C) .

3 تذكر فى حالة التوصيل على التوالى أن تحصل على المقلوب لإيجاد C_{ser} . وكنوع من الاختبار لابد أن تكون الإجابة أصغر من أقل قيمة للمكثفات المنفردة .

الطاقة المختزنة فى مكثف مشحون

الطاقة المختزنة فى مكثف سعته C ويحمل شحنة مقدارها q هى

$$\text{الطاقة} = \frac{\frac{1}{2}q^2}{C} = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}CV^2$$

كثافة الطاقة فى مجال كهربى

تعطى كثافة الطاقة (أى الطاقة فى وحدة الحجوم) والمرتبطة بمنطقة تكون شدة المجال فيها E بالعلاقة :

$$\text{كثافة الطاقة} = \frac{1}{2}K\epsilon_0 E^2$$

حيث K هو ثابت العزل للمادة التى تملأ الحجم .

أسئلة وتخمينات

1 النقطتان A و B عند نفس الجهد . هل يعنى هذا بالضرورة أنه لن يبذل شغل فى حمل شحنة اختبار موجبة من إحدى النقطتين إلى الأخرى ؟ وهل معنى ذلك أنه لن تؤثر أية قوة فى حمل الشحنة من النقطة A إلى الأخرى B ؟ اشرح .

2 هل يمكن أن يتقاطع سطحا تساوى الجهد ؟ اشرح .

3 يكون الجهد المطلق عند منتصف المسافة بين شحنتين نقطيتين متساويتين فى المقدار ومتضادتين فى الإشارة صفرًا . هل يمكنك أن تجد مسارًا واضحًا لا يبذل فيه شغل عند نقل شحنة اختبار موجبة خلاله من اللانهاية إلى هذه النقطة ؟ اشرح .

4 إذا بدأنا من حقيقة أن قطعة من فلز ما تعتبر جسم تساوى الجهد تحت ظروف كهروستاتيكية . فاثبت أن المجال الكهربى داخل قطعة مجوفة من الفلز صفر .

5 لو كان الجهد المطلق فى نقطة ما صفرًا ، فهل معنى ذلك أن المجال الكهربى هناك هو الآخر صفر ؟

6 ماذا عن المجال الكهربى فى منطقة يكون الجهد المطلق فيها ثابتًا ؟

7 إثبت أن جميع نقط جسم فلزى (معدنى) تكون عند نفس الجهد تحت ظروف كهروستاتيكية . وهل ينطبق هذا أيضًا داخل فجوة فى باطن الجسم ؟ وهل يغير من الأمر شيئًا لو علقت شحنة فى الفجوة ؟

8 مكثف متوازى اللوحين توجد على لوحيه شحنة مثبتة q . ثم جذب اللوحان بعيدًا عن بعضهما البعض . ولابد لمن يجذب أن يبذل شغلاً . لماذا ؟ وهل يتغير فرق الجهد أثناء هذه العملية وماذا يحدث للشغل المبذول من جانب من يجذب ؟

9 كرة فلزية مجوفة ومشحونة بانتظام بشحنة مقدارها $+q$. أين تقع هذه الشحنة ؟ هل يكون الجهد المطلق داخل الكرة صفرًا ؟ أم هل يكون ثابتًا ؟ وما هو ؟ أعد بالنسبة لشحنة مقدارها $-q$.

10 كثيرًا ما تستخدم طرف كهروستاتيكية فى الصناعة لدهان الأجسام المعدنية بالرش ؛ حيث يوصّل الرشاش بأحد طرفى مصدر جهد عال ، بينما يتصل الجسم المعدنى المطلوب دهانه بالطرف الآخر . اشرح فكرة عمل هذه الطريقة . ولماذا تولد هذه الطريقة تلوثًا أقل للهواء كما تستهلك دهانًا أقل من الطرق التقليدية ؟

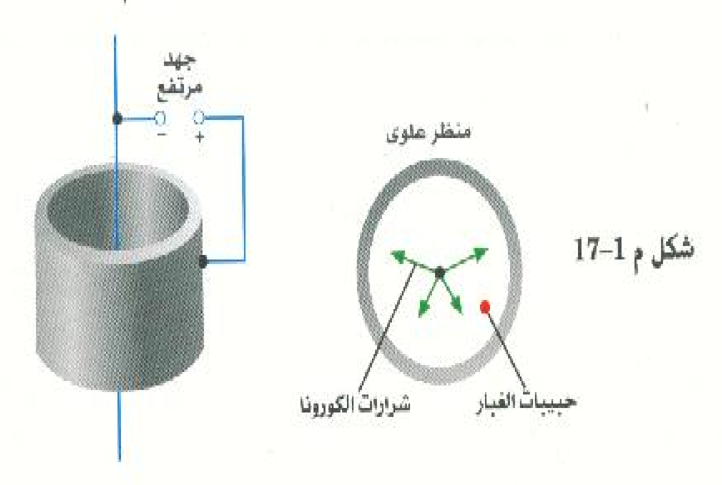
11 كرتان فلزيتان متطابقتان وتحملان شحنات $+q$ و $-2q$. وقد تلامست الكرتان ثم انفصلتا مرة ثانية . ما هى شحناتهما النهائية ؟ وإذا كان نصفا قطرى الكرتين مختلفين فأى الكرتين سيكون لها الشحنة النهائية الأكبر ؟

12 تبلغ الشدة الكهربية للهواء نحو 30,000 V/cm وهذا يعنى انه إذا زادت شدة المجال الكهربى عن هذه القيمة فإن شرارة ستقفز خلال الهواء ، وعندئذ يقال إنه حدث « انهيار كهربى » . استخدم هذه القيمة لحساب فرق الجهد بين جسمين حيث تحدث الشرارة . ومن المواقف المعتاد أن تقفز فيها شرارة بين جسدك ومقبض باب معدنى بعد أن تكون قد سرت على سجادة عميقة الوبر أو انزلقت من على مقعد سيارة بلاستيكى حين يكون الجو جافًا جدًا .

13 ارجع إلى البيانات الواردة فى السؤال السابق لتحسب مقدار الشحنة التى يمكن وضعها فوق كرة معدنية قطرها 50 cm .

14 يوضح الشكل م 1–17 مرسّب كهروستاتيكى بسيط يستخدم لإزالة الدخان من الهواء . وتركيبه كما هو بالشكل ، حيث يمتد سلك دقيق جدًا بطول محور أنبوبة معدنية كبيرة ، ثم يطبق فرق جهد مرتفع بين هذين العنصرين بحيث يتصل السلك بالطرف السالب . فإذا كان السلك رفيعًا جدًا وفرق الجهد كبيرًا فإن المجال الكهربى بالقرب من السلك سيكون مرتفعًا جدًا .

لماذا ؟ وستتكون شرارات ضئيلة (تسمى الكورونا) بالقرب من السلك بسبب حدوث انهيار كهربى (انظر السؤال رقم 12) ، وتُقذف الإلكترونات مبتعدة عن السلك . لماذا ؟ وتقوم هذه الإلكترونات بشحن حبيبات الدخان بشحنة سالبة . كيف ؟ وتندفع هذه الحبيبات نحو الأنبوبة وتترسب هناك . لماذا ؟ ونتيجة لهذا تتم إزالة الدخان من الهواء .



شكل م 1-17

مسائل

الأقسام من 1-17 إلى 4-17

1 ما مقدار الشغل الواجب بذله لحمل شحنة مقدارها $+6.0\,\mu C$ من الطرف السالب لبطارية قوتها 9.0 V إلى الطرف الموجب ؟ وكم لنقلها من الطرف الموجب إلى الطرف السالب ؟

2 ما مقدار الشغل الواجب بذله لنقل إلكترون من الطرف الموجب إلى الطرف السالب لبطارية قوتها 3.0 V ؟ أعد المسألة بالنسبة لبروتون .

3 وصل لوحان معدنيان متوازيان تفصلهما مسافة مقدارها 0.6 mm بطرفى بطارية قوتها 1.5 V . (أ) ما هى شدة المجال الكهربى بين اللوحين ؟ (ب) ما مقدار القوة التى قد يتأثر بها إلكترون موجود بين اللوحين .

4 كانت شدة المجال الكهربى بين لوحين معدنيين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها 0.3 mm هى 3000 V/m . (أ) ما هو فرق الجهد بين اللوحين ؟ (ب) ما مقدار القوة التى يتأثر بها بروتون موجود بين اللوحين ؟

5 ما مقدار الشغل المطلوب لتحريك عدد أفوجادرو من الإلكترونات بين نقطتين حيث يبلغ فرق الجهد 24 V ؟

■ 6 النقطتان A و B موجودتان على المحور x وبينهما مسافة مقدارها 40 cm وتقعان فى منطقة بها مجال كهربى ثابت E وفرق الجهد بها 60 V ، مع العلم بأن جهد النقطة A هو الأكبر . (أ) أوجد E_x ، أى المجال الكهربى الثابت فى الاتجاه x فى نفس المنطقة . (ب) أعد الحسابات لو أن النقطة B هى التى جهدها أعلى .

■ 7 فى منطقة ما من الفضاء كان المجال الكهربى موجهًا باتجاه المحور z الموجب وكان مقداره 4000 V/m . أوجد فرق الجهد بين نقطة الأصل والنقط التى إحداثياتها (x, y, z) كما يلى معبرًا عنها بالمتر : (أ) (0, 0, 8) ، (ب) (16, 0, 0) ، (جـ) (0, 0, -10) ، (د) (-12, 10, 12) .

8 ما مقدار الشغل المبذول عند تحرك بروتون مسافة مقدارها 4 cm بامتداد مجال كهربى منتظم شدته 250 N/C ؟

■ 9 أطلق إلكترون عند نقطة أصل الإحداثيات فى منطقة بها مجال كهربى شدته 2800 V/m ويتجه باتجاه المحور y الموجب . (أ) أوجد الوقت الذى يستغرقه إلكترون حتى يصل مقدار سرعته إلى 7.2×10^6 m/s . (ب) ما هى المسافة التى يقطعها الإلكترون خلال هذه الفترة ؟

10 يتحرك بروتون على امتداد المحور x الموجب بسرعة مقدارها 6.0×10^5 m/s . ثم طبق مجال كهربي بحيث كانت $E_x = -500$ V/m ، $E_y = E_z = 0$. (أ) ما هو مقدار سرعة البروتون بعد أن ينتقل مسافة مقدارها 3 m ؟ (ب) كم من الوقت يستغرقه البروتون ليصل إلى هذه النقطة ؟

11 أنطلق بروتون من السكون وتسارع خلال فرق للجهد مقداره 60 V . ما هو مقدار السرعة النهائية للبروتون ؟ أعد المسألة بالنسبة لإلكترون .

12 ما مقدار فرق الجهد الذى على جسيم ألفا الحركة خلاله إذا أريد له أن يتسارع من السكون إلى سرعة تصل إلى 10^5 m/s ؟ (كتلة جسيم ألفا هى $m_\alpha = 4 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg أما شحنته فهى $q_\alpha = 2e$) .

13 يبلغ فرق الجهد بين لوحى التسارع فى جهاز تليفزيون نحو 25,000 V . فإذا كانت المسافة بين اللوحين هى 1.5 cm . فما هو المجال الكهربى المنتظم بين اللوحين ؟

14 قذف إلكترون من لوح معدنى كبير نحو لوح آخر موازٍ له . فإذا كانت السرعة الابتدائية للإلكترون هى 6×10^6 m/s وكان مقدار سرعته قبل أن يضرب اللوح الثانى مباشرة هو 4×10^6 m/s ، فكم يكون فرق الجهد بين اللوحين ؟ وهل اللوح الثانى عند جهد أعلى أم أدنى من جهد اللوح الأول ؟

15 قذف بروتون بسرعة مقدارها v_0 من لوح معدنى نحو لوح ثانٍ موازٍ للأول . فإذا كان هناك فرق للجهد مقداره V بين اللوحين ، فما هو مقدار سرعة البروتون قبل أن يضرب اللوح الثانى مباشرة . هل هذه الإجابة فريدة ؟ إن لم تكن ، فعليك إيجاد الإجابات الأخرى الممكنة .

القسم 5-17

16 (أ) ما هو مقدار سرعة بروتون طاقته 2.4 keV ؟ (ب) ما هو مقدار سرعة إلكترون طاقته 0.2 keV ؟

17 ما مقدار فرق الجهد اللازم لإيقاف إلكترون يتحرك بسرعة ابتدائية مقدارها 5.0×10^5 m/s ؟

18 تبلغ طاقة حركة جسيم ألفا (كتلته $m_\alpha = 4 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg وشحنته $q_\alpha = 2e$) 7.2 MeV . (أ) ما مقدار الطاقة بوحدات جول ؟ (ب) ما مقدار سرعة الجسيم ؟ (جـ) ما مقدار فرق الجهد الذى على الجسيم الحركة خلاله حتى يصل إلى هذه الطاقة ؟

19 يتسارع أيون ليثيوم ثلاثي التأين (كتلته $m_\alpha = 6.94 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg وشحنته $q_\alpha = 3e$) خلال فرق للجهد مقداره 7200 V . ما هى قيمة طاقة الحركة بوحدات الإلكترون فولت ؟ ما مقدار سرعة الأيون ؟

20 يُسرّع أيون خلال فرق للجهد مقداره 417 V حتى صارت طاقة حركته 2.0×10^{-16} J . ما هى شحنة الأيون ؟

21 تتسارع البروتونات فى معجل (مسارع) فان دى جراف فى أحد معامل الأبحاث من السكون خلال فرق للجهد مقداره 250,000 V . (أ) ما هو مقدار طاقة حركة البروتونات بوحدات الإلكترون فولت ؟ وما هى طاقة حركة البروتونات بوحدات جول ؟ (جـ) ما مقدار سرعة البروتونات ؟

22 يبلغ فرق الجهد بين لوحين متوازيين 80 V . (أ) قذف بروتون من اللوح السالب نحو اللوح الموجب بطاقة حركة ابتدائية مقدارها 100 eV . ما هو مقدار طاقة حركة البروتون قبل أن يضرب اللوح الموجب مباشرة ؟ (ب) أعد المسألة إذا قذف البروتون من اللوح الموجب نحو اللوح السالب .

23 ما مقدار الطاقة التى يكتسبها جسيم مشحون بشحنة مقدارها 60 μC عندما يُعجّل خلال فرق للجهد مقداره 100 V ؟

24 يُعجّل (يسارع) إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها 4.0×10^6 m/s خلال فرق للجهد مقداره 30 V . ما هو مقدار السرعة الجديدة للإلكترون ؟

25 تتناقص السرعة الابتدائية لبروتون والتى مقدارها 6.0×10^7 m/s حتى تصير سرعته النهائية 4.0×10^7 m/s ما مقدار فرق

الجهد الذى لزم أن يتحرك فيه البروتون حتى تتناقص سرعته على هذا النحو ؟

26 قذف بروتون بطاقة حركة تبلغ 4800 eV من لوح سالب نحو لوح موجب . وكان فرق الجهد بين اللوحين 2000 V . (أ) ما مقدار طاقة الحركة (بالإلكترون فولت) التى يفقدها البروتون عند تحركه نحو اللوح الموجب ؟ (ب) ما مقدار طاقة حركته (بالإلكترون فولت) قبل أن يضرب اللوح مباشرة ؟ (جـ) أعد الحسابات بالنسبة لجسيم ألفا له نفس طاقة الحركة الابتدائية . (شحنة جسيم ألفا ، وهو طبعًا نواة الهليوم ، هى $2e$) .

القسم 17-6

27 ما هو الجهد المطلق عند نقطة تبعد مسافة 3.2×10^{-14} m من نواة ذرية إذا كانت شحنة النواة هى $76\ e$ ؟ إهمل وجود الإلكترونات فى الذرة . ولو أن بروتونا أطلق من هذه النقطة فكم ستكون طاقة حركته (بملايين الإلكترون فولت) عندما يصير بعيدًا عن النواة ؟

28 ما هى المسافة التى تبعد بها نقطة عن شحنة مقدارها $-8\ \mu C$ ليكون الجهد الكهربى عند تلك النقطة -2.3×10^4 V ؟

29 يدور الإلكترون فى نموذج بوهر لذرة الهيدروجين حول البروتون فى مدار نصف قطره 0.51×10^{-10} m .

30 وضعت شحنتان نقطيتان على المحور x : شحنة مقدارها $+6.0\ \mu C$ عند نقطة أصل الإحداثيات والأخرى $-5.0\ \mu C$ عند $x = 16.0$ cm . أوجد الجهد المطلق الناشئ عن هاتين الشحنتين عند (أ) $x = 12$ cm و (ب) $x = -6$ cm .

31 وضعت أربع شحنات متساوية ، كل منها $-5.0\ \mu C$ عند الأركان الأربعة لمربع طول ضلعه 40 cm . ما هو الجهد المطلق عند مركز المربع ؟

32 أعد المسألة السابق 31 لو كانت إحدى الشحنات الأربع موجبة .

■ 33 وضعت شحنة مقدارها -4.0×10^{-9} C عند نقطة أصل الإحداثيات ، ووضعت شحنة أخرى مقدارها 6.0×10^{-9} C ، عند $x = 2.4$ m . حدد موقعين على المحور x يكون فيهما الجهد الكهربى لهاتين الشحنتين صفرًا .

34 وضعت شحنة مقدارها $6.0\ \mu C$ عند النقطة (0, 1.0) حيث كانت وحدات الإحداثيات بالمتر . ثم وضعت شحنة أخرى مقدارها $-4.0\ \mu C$ عند (-3.0, 0) . أوجد الجهد المطلق الناشئ عن هاتين الشحنتين عند (أ) (-3.0, 0) ، (ب) (1.0, 0) .

■ 35 الشحنتان النقطيتان $q_1 = -5$ nC و $q_2 = 4$ nC تفصلهما مسافة مقدارها 40 cm . ما هو الجهد المطلق (أ) عند نقطة تقع على منتصف المسافة بين الشحنتين و (ب) عند نقطة على بعد 40 cm من كل من الشحنتين ؟

■ 36 كرة معدنية نصف قطرها 30 cm تحمل شحنة منتظمة مقدارها 8.0×10^{-9} C . وإذا اعتبرنا هذه الكرة بعيدة عن جميع الأجسام الأخرى فكم يكون مقدار الجهد المطلق عند سطحها ؟

القسم 17-7

37 عندما تكون ألواح أحد مكثفات جهاز راديو مشحونة بشحنة مقدارها $1.8\ \mu C$ فإن فرق الجهد بينها يكون 9.0 V . ما مقدار سعة ذلك المكثف ؟

38 ما مقدار الشحنة على مكثف سعته 36 nF ويقع تحت فرق جهد مقداره 840 V ؟

■ 39 تزداد الشحنة على ألواح مكثف بمقدار $24.0\ \mu C$ عندما يرتفع فرق الجهد بينها من 18.0 إلى 34.0 . ما مقدار السعة ؟

40 تبلغ المسافة بين لوحى مكثف متوازى اللوحين 0.05 mm وكانت سعة المكثف $0.4\ \mu C$. ما هى مساحة كل من لوحى المكثف ، إذا كان الحيز بينهما فراغًا ؟

■ 41 مساحة كل لوح من لوحي مكثف متوازى اللوحين $280\ cm^2$ وتفصلهما مسافة مقدارها 0.5 mm . ما هو مقدار المجال الكهربى بين اللوحين عندما تكون شحنة المكثف $1.0\ \mu C$ ؟

42 لو أن الفجوة بين لوحى مكثف متوازى اللوحين نصفت بينما تضاعفت مساحة اللوح ثلاث مرات ، فكم تكون النسبة بين

السعة الجديدة إلى السعة الأصلية للمكثف ؟

■ 43 وضع لوحان متماثلان بحيث يتوازيان وتفصلهما مسافة مقدارها 0.05 mm . وقد كانت مساحة كل منهما $360\ cm^2$. (أ) أوجد سعة المجموعة لو وجد فراغ بين اللوحين . (ب) ما مقدار الشحنة المختزنة بالمكثف عندما يتصل ببطارية قوتها 9.0 V ؟

القسمان 8-17 و 9-18

44 أعد الجزءين (أ) و (ب) فى المسألة رقم (43) لو ملئ الحيز بين اللوحين بمادة بلاستيكية ثابت عزلها $K = 4.0$.

45 كم يجب أن تكون مساحة اللوح فى مكثف سعته $12\ \mu C$ إذا كان هناك غشاء من أكسيد الألمونيوم سمكه $20\ nm$ يملأ الفجوة بين لوحيه المتوازيين ؟ اعتبر $K = 8$ بالنسبة لأكسيد الألمونيوم .

■ 46 تحدث شرارة فى الهواء إذا زادت شدة المجال الكهربى عن نحو $3.0 \times 10^6\ V/m$. ما مقدار الشحنة التى توضع على مكثف متوازى اللوحين سعته 30 pF ويوجد هواء بين لوحيه قبل أن تحدث الشرارة ؟ اعتبر مساحة كل من اللوحين $30\ cm^2$.

■ 47 مكثف هوائى متوازى اللوحين يحمل شحنة مقدارها 28 nC عندما يكون تحت فرق للجهد مقداره V_0 . وعندما يمتلئ الحيز بين اللوحين بسائل ما ، فإن الشحنة تزداد حتى تبلغ 48 nC فى حين يظل فرق الجهد ثابتا عند V_0 . ما هو ثابت العزل للسائل ؟

■ 48 شحن مكثف هوائى متوازى اللوحين إلى أن أصبح فرق الجهد بين لوحيه 120 V ثم فصل عن البطارية . وعندما ملئ الحيز بين اللوحين تمامًا بقطعة من الزجاج فإن فرق الجهد عبر المكثف هبط إلى 30 V . ما هو ثابت عزل الزجاج ؟

القسم 10-17

49 وُصِّل مكثفان ، $C_1 = 6\ \mu C$ و $C_2 = 12\ \mu C$ على التوازى ، ثم وُصِّلت المجموعة ببطارية قوتها 9.0 V . (أ) ما هى السعة المكافئة للمجموعة ؟ (ب) ما هو فرق الجهد عبر كل من المكثفين ؟ (جـ) ما هى الشحنة المختزنة فى كل من المكثفين ؟

50 وُصِّل المكثفان المذكوران فى المسألة السابقة على التوالى مع بطارية قوتها 9.0 V . أوجد (أ) السعة المكافئة للمجموعة ، (ب) فرق الجهد عبر كل مكثف و (جـ) الشحنة على كل مكثف .

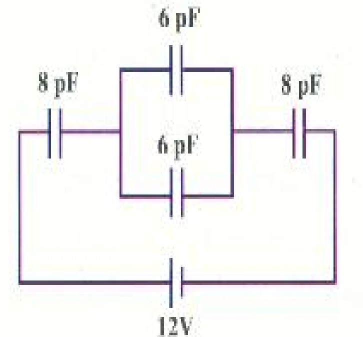
51 وصلت ثلاث مكثفات هى $C_1 = 40\ pF$ ، $C_2 = 60\ pF$ ، $C_3 = 120\ pF$ معًا . (أ) أوجد السعة المكافئة للمجموعة إذا كان التوصيل على التوازى ، (ب) ما هى السعة المكافئة إذا كان التوصيل على التوالى ؟

52 وصلت المجموعة المذكورة فى المسألة 51 ببطارية قوتها 9.0 V . أوجد الشحنة على كل مكثف وفرق الجهد عبره عندما يكون التوصيل (أ) على التوالى ، (ب) على التوازى .

■ 53 دائرة كهربية متصلة على التوالى وتضم مكثفًا سعته $0.5\ \mu C$ ومكثفًا سعته 40 pF وبطارية قوتها 120 V . أوجد الشحنة على كل من المكثفين . وما مقدار الشحنة على كل من المكثفين إذا وصلا على التوازى عبر البطارية ؟

■ 54 كم قيمة للسعة يمكن الحصول عليها عند توصيل المكثفات التالية بطرق مختلفة :
$4\ \mu F$ ، $8\ \mu F$ ، $16\ \mu F$ ؟ وما هى هذه القيم ؟

■ 55 وصلت أربع مكثفات بالطريقة المبينة فى الشكل م 2-17 أوجد (أ) السعة المكافئة للمجموعة و (ب) الشحنة على كل مكثف وفرق الجهد عبره .



شكل م 2-17

القسمان 11-17 و 12-17

56 مكثف متصل ببطارية قوتها 120 V ويختزن شحنة مقدارها 45 μ C . (أ) ما هى سعة ذلك المكثف ؟ (ب) ما مقدار الطاقة التى يختزنها المكثف ؟

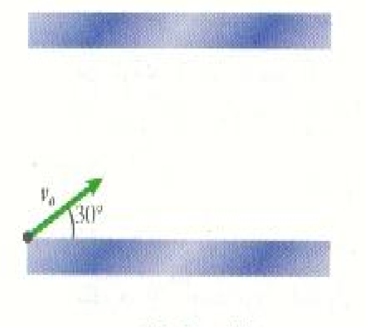
57 شحن مكثف متوازى اللوحين ثم فصل عن البطارية . كيف تتغير الطاقة المختزنة فى المكثف إذا ضوعفت المسافة بين اللوحين ؟

■ 58 أوجد الطاقة المختزنة فى كل من المكثفات الموضحة فى الشكل م 2-17 .

59 مكثف متوازى اللوحين تبلغ مساحة كل من لوحيه 4 cm^2 وتفصلهما مسافة مقدارها 0.5 mm . ملئ الحيز بين اللوحين بمادة ثابت عزلها $K = 8$. فإذا وُصلت بطارية قوتها 12 V بالمكثف فكم من الطاقة سوف يختزن ؟ ما هو العامل الذى سيتغير به مقدار الشحنة المختزنة إذا أزيل العازل وملئ الحيز بين اللوحين بالهواء بينما ظلت البطارية متصلة بالمكثف ؟

مسائل إضافية

■ 60 علقت كرة صغيرة تحمل شحنة مقدارها +30 nC بواسطة خيط بين لوحين أفقيين متوازيين تفصلهما مسافة مقدارها 40 cm . (أ) عندما يكون فرق الجهد بين اللوحين 6000 V فإن الشد فى الخيط يكون صفرًا ، فما هى كتلة الكرة ؟ (ب) ما مقدار الشد فى الخيط عندما تعكس قطبية اللوحين ؟

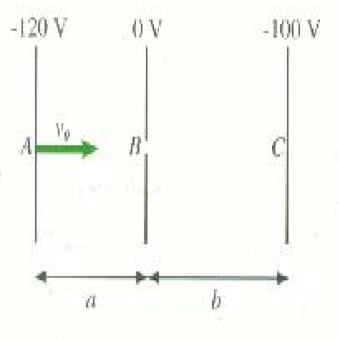


شكل م 3-17

■■ 61 تفصل مسافة مقدارها 5.0 cm بين لوحين متوازيين رأسيين وفرق الجهد بينهما 8000 V ، وعلقت كرة صغيرة (كتلتها $m = 2 \times 10^{-4}$ g) مثل البندول بين اللوحين . ويستقر الخيط الرفيع الذى لا كتلة له ويمسك الكرة إلى وضع الاتزان عندما يصنع زاوية مقدارها 15° مع الرأسى . أوجد الشحنة التى على الكرة .

■■ 62 قذف بروتون من اللوح السفلى الموضح فى الشكل م 3-17 بسرعة $v_0 = 4 \times 10^4$ m/s بالزاوية المبينة فى الشكل . ما هو مقدار فرق الجهد اللازم وجوده بين اللوحين لو كان على البروتون مجرد ألا يضرب اللوح العلوى ؟

■ 63 قذف إلكترون من اللوح السفلى المبين فى الشكل م 3-17 بالزاوية المبينة ، وكان فرق الجهد بين اللوحين 3000 V . كم يجب أن يكون مقدار السرعة الابتدائية للإلكترون لو كان عليه مجرد ألا يضرب اللوح العلوى ؟ وهل يجب أن يكون اللوح العلوى موجبًا أم سالبًا ؟



شكل م 4-17

■ 64 قذف إلكترون من اللوح A ، الموضح فى الشكل م 4-17 ، نحو لوح آخر B مواز له بسرعة ابتدائية $v_0 = 4.0 \times 10^6$ m/s . وكانت الألواح A ، B و C عند الجهود -120 V ، 0 V ، -100 V على الترتيب . فإذا فرضنا أن الإلكترونات تنتقل بحيث تكون متعامدة على الألواح فكم سيكون مقدار سرعتها قبل أن تضرب اللوح C مباشرة ؟ اعتبر $a = 8.0$ cm و $b = 10.0$ cm .

■ 65 تقع شحنة نقطية مقدارها 10.0 μ C عند نقطة أصل الإحداثيات . ما مقدار الشغل المطلوب بذله لإحضار شحنة موجبة مقدارها 3.0 μ C من مالانهاية إلى الوضع $x = 20.0$ cm ؟

66 وضعت شحنة اختبار $q_1 = 0.2\ \mu C$ على المحور y وعلى مسافة +4.0 cm بعيدًا عن شحنة مثبتة $q_2 = 20.0\ \mu C$ موضوعة عند نقطة أصل الإحداثيات . ثم حركت شحنة الاختبار q_1 لمسافة 8.0 cm على امتداد المحور y ، ثم حركت لمسافة 9.0 cm موازية للمحور x وبعيدًا في المرتين عن الشحنة المثبتة . ما هو التغير فى طاقة الوضع الكهربية لشحنة الاختبار q_1 ؟

67 علقت كرة معدنية صغيرة نصف قطرها 3.0 cm بواسطة خيط رفيع عند مركز غرفة كبيرًا جدًا . وكانت الكرة تحمل شحنة مقدارها -6×10^{-8} C . ما هو فرق الجهد التقريبى بين الكرة وجدران الغرفة ؟

68 كيف يمكن توصيل أربعة مكثفات سعة كل منها $3\ \mu F$ لكي تكون سعة المجموعة الكلية هى (أ) $12\ \mu F$ ، (ب) $3\ \mu F$ ، (جـ) $1.2\ \mu F$ ، (د) $1.5\ \mu F$ ؟

69 شحن مكثف سعته $1.0\ \mu F$ وذلك بتوصيله ببطارية قوتها 12 V . ثم فصل المكثف عن البطارية ووصل بمكثف غير مشحون وسعته $3.0\ \mu F$. ما مقدار الشحنة على كل من المكثفين ؟ وما مقدار فرق الجهد عبر كل منهما ؟

70 مكثف متوازى اللوحين يمكن تغيير المسافة بين لوحيه دون إحداث اضطراب بالمنظومة الكهربية . فإذا كانت الفجوة في الوضع A فإن السعة تكون 40 pF وعندما تكون فى الوضع B تصبح السعة 36 pF . وقد شحن المكثف بواسطة بطارية قوتها 9.0 V عندما كانت الفجوة فى الوضع A . ثم نزعت البطارية وتغير وضع الفجوة إلى B دون أن تتغير الشحنة عليه . (أ) ما مقدار الشحنة على المكثف عندما تكون الفجوة في الوضع A ؟ (ب) ما مقدار فرق الجهد عبر المكثف عندما تكون الفجوة في الوضع B ؟(جـ) ما مقدار التغير فى الطاقة المختزنة عندما تتغير الفجوة من الوضع A إلى الوضع B ؟ (د) ما هو الحد الأدنى من الشغل الذى يبذله شخص يمسك باللوحين ليغير المكثف من وضع الفجوة A إلى وضع الفجوة B ؟

71 أعد المسألة 70 لو تركت البطارية متصلة إلى اللوحين أثناء تغير المكثف من وضع الفجوة A إلى الفجوة B .

72 بندول طوله L يتعلق من سقف غرفة بها مجال كهربى يتجه إلى أسفل وكانت كتلة كرة البندول هى m وتحمل شحنة مقدارها q . أوجد تردد البندول عند حدوث اهتزازات ذات زوايا صغيرة .

73 أوجد السعة المكافئة للمجموعة الموضحة بالشكل م 5-17 عندما يفتح المفتاح S .

شكل م 5-17

74 أوجد السعة المكافئة للمجموعة الموضحة بالشكل م 5-17 عند غلق المفتاح S .

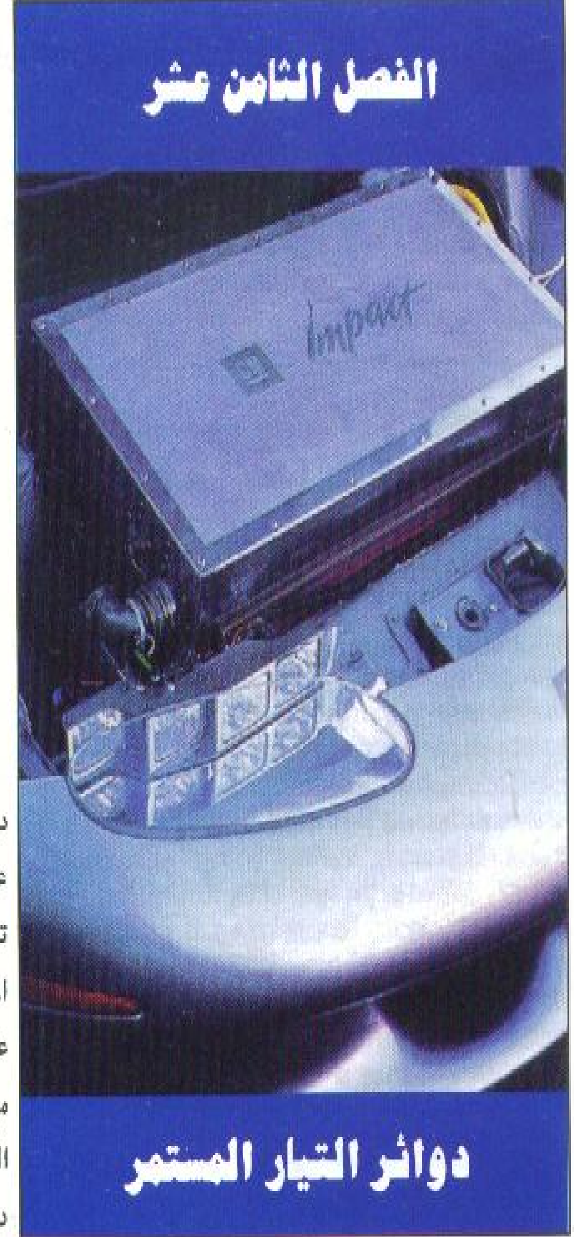
75 شحن مكثفان أحدهما سعته $4\ \mu F$ والآخر سعته $6\ \mu F$ على انفراد حتى فرق جهد مقداره 100 V وذلك بتوصيلهما كل على حدة عبر بطارية . وبعد أن فصلا عن البطارية وصل الطرف الموجب لأحدهما باللوح الموجب للآخر واللوح السالب لأحدهما باللوح السالب للآخر . أوجد (أ) الجهد عبر كل من المكثفين ؛ (ب) الشحنة النهائية على كل من المكثفين .

تلميح : بعد فصل المكثفين يكون فرق الجهد عبر كل منهما هو نفسه .

76 أعد المسألة 75 ولكن عند توصيل اللوح الموجب لأحد المكثفين باللوح السالب للمكثف الآخر .

الفصل الثامن عشر

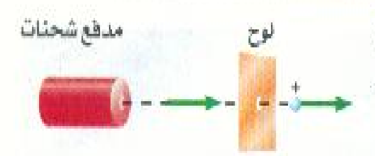
دوائر التيار المستمر



درسنا فى الفصلين السابقين خواص الشحنات الكهربية الساكنة على أن معظم التطبيقات العملية للكهرباء تنطوى على شحنات تتحرك ، أو بعبارة أخرى على تيارات كهربية . فالشحنات المتدفقة خلال ملفات محرك كهربائى ، مثلاً ، هى التى تدفع عمود الحركة إلى الدوران . وتشع المصابيح الكهربية الضوء بسبب مرور الشحنات فى فتيلاتها . وعندما تدير مفتاح الراديو أو التليفزيون فإنه يبدأ فى العمل لأن شحنات تسرى خلال دوائرهما . وعلى الرغم من كون معظم الأجهزة الشائعة فى الصناعة وفى المنازل تعمل بالتيار المتردد (ac) الذى يسرى فى دوائرها ، حيث تتدفق الشحنات جيئة وذهابًا خلال الوصلات ، إلا أننا سنبدأ دراستنا للشحنات المتحركة بمناقشة الأبسط أولاً وهى حالة دوائر التيار المستمر (dc) ، حيث تسرى الشحنات خلال الموصِّل دون أن تعكس اتجاه حركتها . والسيارة التى تدار بالكهرباء (فى الصورة العليا) مثال على استخدام دوائر التيار المستمر .

18-1 التيار الكهربى

سنبدأ مناقشتنا للشحنات المتحركة بتعريف كمية يطلق عليها التيار الكهربى . افترض أن لدينا جهازًا يطلق عليه **مدفع شحنات** ، وهو قادر على قذف تيار من الجسيمات المشحونة كالأيونات أو الإلكترونات (يستخدم فى أجهزة التليفزيون مثل هذه الأداة لقذف حزمة من الإلكترونات على الشاشة) وبالنسبة لدراستنا ، افترض مدفعًا يقذف بحزمة من الجسيمات المشحونة خلال ثقب فى لوح كما فى الشكل 1-18 .



شكل 1–18:
تمر حزمة من الشحنات المتحركة خلال ثقب في اللوح . فإذا مرت شحنة مقدارها Δq من خلال الثقب في زمن مقداره Δt ، فإن التيار يكون $\Delta q/\Delta t$.

وتشكل هذه الحزمة المارة خلال الثقب فيضًا من الشحنات ، والذى نرجوا الآن أن نصف مقداره . وسنفعل ذلك بتعريف كمية سنطلق عليها **التيار الكهربى** وسنرمز له بالرمز I :

فى فترة زمنية مقدارها Δt فإن الحزمة تحمل شحنة مقدارها Δq عبر نقطة معينة (كالثقب الموجود فى اللوح فى هذه الحالة) ، والتيار الذى تحمله هذه الحزمة يكون عندئذ :

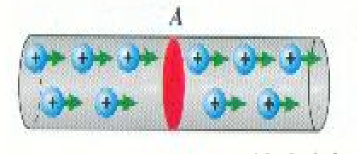
$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (18\text{–}1)$$

ووحدات SI للتيار التى هو كولوم لكل ثانية تسمى الأمبير .

والأمبير الواحد (A) = كولوم واحد لكل ثانية (C/s) .

وإذا كانت الشحنات التى فى الحزمة موجبة ، فإن كلاً من Δq و I يكون موجبًا . أما إذا كانت الحزمة تتألف من شحنات سالبة فإن كلاً من Δq و I يكون سالبًا . ولهذا السبب يكون تدفق الشحنة السالبة فى اتجاه ما مكافئًا لتيار موجب فى الاتجاه المعاكس .

وقد نعترض ، بأنه حيث قد ثبت أن الشحنات الفعلية التى تتحرك داخل الموصلات هى إلكترونات ، فلابد أن يُعرَّف التيار بدلالة تدفق الشحنة السالبة . على أنه من الناحية التاريخية ، وقبل أن تُعرف إشارة ناقلات الشحنة ، فإن التيار كان يُعرَّف بدلالة حركة الشحنات الموجبة . وبمجرد أن عُرفت طبيعة ناقلات الشحنة لم يكن هناك إلزام بتغيير التعريف وذلك لأن التكافؤ بين تدفق الشحنة الموجبة والشحنة السالبة بسيط للغاية .



شكل 2–18:
يُعرَّف التيار بالأمبير ـ المار فى السلك على أنه كمية الشحنة الموجبة بالكولوم المتدفقة خلال مقطع مستعرض مثل A فى الثانية .

ولكى نعرف ماذا يعنى هذا التعريف بالنسبة للتيارات المارة فى الأسلاك سنرجع إلى الشكل 2–18 . لو أن مقدارًا من الشحنة Δq يمر من خلال مقطع مستعرض عند A فى زمن مقداره Δt ، فإن التيار فى السلك يُعرَّف بالمعادلة 1–18 وهو :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

تمامًا كما فى الشكل 1–18 . ومرة أخرى يعتبر التيار متدفقًا فى اتجاه حركة الشحنة الموجبة ، متفقًا فى ذلك مع تعريفنا السابق .

مثال توضيحى 1–18

كان التيار خلال بصيلة المصباح الكهربى للجيب هو 0.150 A . ما عدد الإلكترونات المتدفقة خلال البصيلة فى الثانية الواحدة ؟

استدلال منطقى : بما أن التيار هو مقدار الشحنة المارة عبر نقطة فى الثانية ، لذا فنحن نعلم أن 0.150 C من الشحنة تمر خلال البصيلة كل ثانية . ونعلم أيضًا أن كل إلكترون يحمل شحنة مقدارها 1.6×10^{-19} C . وعلى هذا يكون عدد الإلكترونات التى يجب أن

تكوّن شحنة مقدارها 0.150 هو :

$$\text{عدد الإلكترونات} = \frac{0.15\ C}{1.60 \times 10^{-19}\ C/electron} = 9.3 \times 10^{17}$$ إلكترونًا .

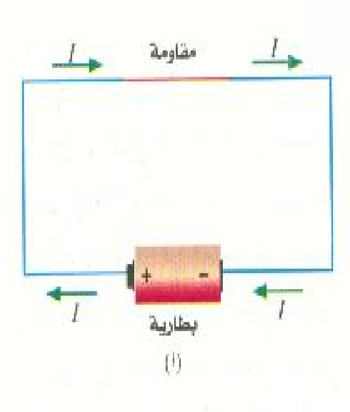
وكما سنرى بعد قليل فإن هذا العدد الهائل من الشحنات المتدفقة هو الذى يجعل التيارات الكهربية المارة فى الأسلاك شبيهة بتدفق المياه فى الأنابيب . ■

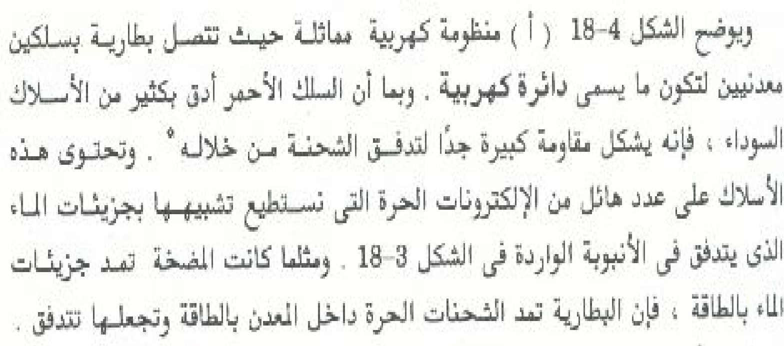


شكل 3-18:
يسبب الاحتكاك تباطؤ الجسم إلى أن يتوقف تمامًا .

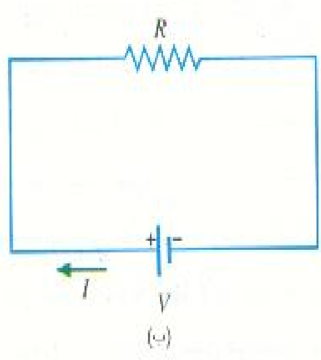
18-2 دائرة كهربية بسيطة

قبل أن نشرع فى دراسة الأسلوب الذى تسلكه دائرة كهربية ما ، فسننظر فى حالة أكثر سهولة فى التصور ، وهى سريان الماء خلال الأنابيب . يوضح الشكل 3-18 منظومة أنابيب مملوءة تمامًا بالماء . تقوم مضخة بتوفير الطاقة التى تنتقل إلى جزيئات الماء وتدفعها إلى السريان خلال الأنبوبة ، وحيث أن الماء يملأ المنظومة كلها وهو أيضًا غير قابل للانضغاط فإن جميع أجزاء الأنبوبة ستحمل نفس تيار الماء . والأنبوبة من الكبر بحيث لن يحدث سوى القليل من الفقد نتيجة اللزوجة ، على أن قسمًا من الأنبوبة يميز بكلمة « مقاومة » قد حشى بالصوف الزجاجى حتى يجد الماء صعوبة كبيرة فى المرور من خلاله . ومن الواضح أن قسم المقاومة يشكل العقبة الرئيسية للتدفق ؛ حتى أن كل الطاقة المنتقلة إلى الماء تقريبًا ستظهر كفقد للطاقة نتيجة اللزوجة (أى على هيئة حرارة) فى قسم المقاومة . وعمليًا فإن الماء - ببساطة - يحمل الطاقة من المضخة إلى قسم المقاومة حيث تتحول الطاقة إلى طاقة حرارية .





ويوضح الشكل 4-18 (أ) منظومة كهربية مماثلة حيث تتصل بطارية بسلكين معدنيين لتكون ما يسمى **دائرة كهربية** . وبما أن السلك الأحمر أدق بكثير من الأسلاك السوداء ، فإنه يشكل مقاومة كبيرة جدًا لتدفق الشحنة من خلاله* . وتحتوى هذه الأسلاك على عدد هائل من الإلكترونات الحرة التى نستطيع تشبيهها بجزيئات الماء الذى يتدفق فى الأنبوبة الواردة فى الشكل 3-18 . ومثلما كانت المضخة تمد جزيئات الماء بالطاقة ، فإن البطارية تمد الشحنات الحرة داخل المعدن بالطاقة وتجعلها تتدفق .



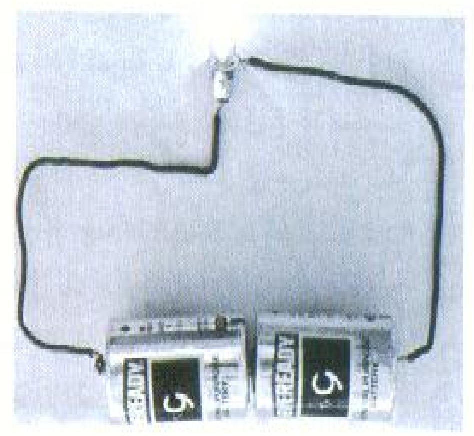
شكل 4-18:
البطارية تجعل الشحنات تسرى فى الدائرة . وتنطلق الطاقة التى أعطيت للشحنات من جانب البطارية على هيئة حرارة فى المقاومة . والجزء (ب) من الشكل هو تخطيط للدائرة الموضحة فى (أ) .

لاحظ أن التيار الموجب يسرى **من** الطرف الموجب للبطارية متوجهًا **إلى داخل** الطرف السالب . وقد رأينا فى الفصل السابق أن البطارية تؤدى نفس الوظيفة عند شحن مكثف . على أن الأمر لم يستغرق هناك سوى زمن قصير لأن المكثف قام ببناء جهد مساوٍ لذلك الذى للبطارية بسرعة أما فى الحالة الراهنة ، فإن سريان الشحنة خلال البطارية والدائرة يكون **مستمرًا** .

إن معظم الطاقة التى توفرها البطارية يفقد على هيئة حرارة عندما تتدفق الشحنة

* ويمكن بدلاً من ذلك أن يصنع السلك الملون من معدن آخر ومقاومته أكبر بكثير تجاه سريان الشحنة عن المعدن المستخدم فى توصيل باقى الدائرة . ومن أمثلة هذه المنظومة تلك التى يستخدم فيها الحديد للسلك الملون والنحاس للسلك الأسود .

خلال السلك ذى المقاومة المرتفعة . أى أن الشحنات المتدفقة تحمل - ببساطة - الطاقة من البطارية إلى المقاومة ، حيث تتحول طاقتها إلى طاقة حرارية عند اصطدامها مع ذرات المادة المقاومة . والحقيقة ، أنه لو كانت كمية الحرارة المتولدة فى المقاومة كبيرة بما يكفى فإن السلك يصبح ساخنًا لدرجة الابيضاض . ويوضح الشكل 5-18 مثالاً لهذا حيث تقوم البطارية بجعل الشحنة تتدفق خلال بصيلة مصباح كهربى . وتتوهج فتيلة البصيلة وهى من سلك دقيق كالشعرة إلى درجة الابيضاض عندما تنطلق من خلالها الطاقة التى وفرتها البطارية .



شكل 5-18:
دائرة بسيطة . من أين يأتى الضوء والحرارة اللتان تشعهما البصيلة ؟

يوضح الشكل 4-18 (ب) المخطط المستخدم لتمثيل الدائرة المرسومة فى (أ) . لاحظ الرمز ⩘⩘ المستخدم للدلالة على سلك المقاومة . وسنسمى هذا الرمز **مقاوم** . أما كل الأسلاك الأخرى فى الدائرة فإن مقاومتها ستعتبر مهملة ولذا لن تتولد بها أية حرارة تذكر . وتصل الطاقة التى توفرها بطارية قوتها V إلى المقاوم R حيث تتحول هناك إلى طاقة حرارية .

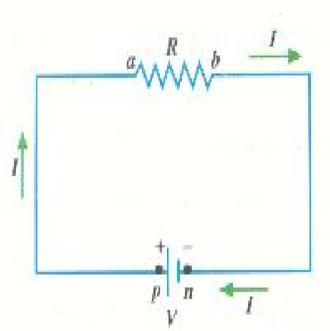
وقبل أن نغادر هذا القسم لابد أن نشير إلى تشابه آخر بين سريان الماء فى أنبوبة وسريان الشحنة فى دائرة كهربية . ففى الدائرة المائية ، يكون واضحًا أن كمية الماء إذا دخلت من أحد طرفى المضخة فإن كمية مساوية ستتدفق من الطرف الآخر . وبما أن الأنبوبة مملوءة ، فإن الماء لن يستطيع أن يتدفق فى قسم إلا إذا تدفق فى جميع الأقسام . ومثلما تسلك جزيئات الماء فإن الشحنات الحرة فى دائرة كهربية تملأ « الأنابيب » التى تحملها وهى الأسلاك . وعندما تتدفق أية كمية من الشحنة داخل أحد طرفى البطارية ، فإن كمية مساوية لها لابد وأن تتدفق خارج الطرف الآخر . ولهذا فإن التيار (سريان الشحنة فى الثانية) يكون هو نفسه فى كل مكان فى الدائرة المرسومة فى الشكل 4-18 .

3-18 المقاومة وقانون أوم

سنفحص الآن الدائرة المبينة فى الشكل 6-18 . بما أننا اعتبرنا أن جزءًا مهملاً فقط من فقد الطاقة هو الذى يحدث فى السلك فى المنطقة من p إلى a ولذا لن تتغير طاقة الشحنات عندما تنتقل خلال هذا القسم من السلك . بعبارة أخرى يكون السلك pa متساوى الجهد ، أى أن النقطة a عند نفس الجهد الكهربى الذى تكون عنده النقطة p .

وبالمثل النقطة b عند نفس جهد النقطة n . ومن ثم نصل إلى حقيقة أن فرق الجهد عبر المقاوم هو نفس فرق الجهد عبر البطارية وهو V .

وحيث أن الطرف a للمقاوم متصل بالطرف الموجب للبطارية ، فإن النقطة a عند جهد أعلى من النقطة b . وأية شحنة موجبة حرة الحركة خلال القاوم سوف تتحرك من a إلى b . وبعبارة أخرى من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض . ومن ثم يكون اتجاه التيار خلال المقاوم من a إلى b . وفي الحقيقة فإن ،



شكل 6-18:
يسبب الاحتكاك تباطؤ الجسم إلى أن يتوقف تماما .

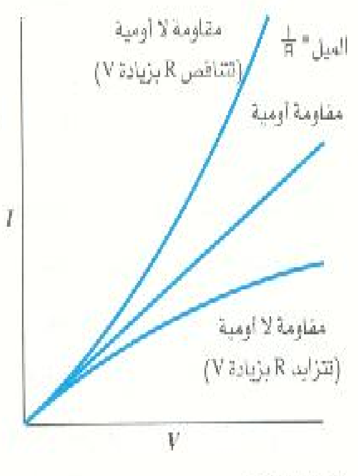
يكون اتجاه التيار خلال مقاوم من الطرف ذى الجهد المرتفع إلى الطرف ذى الجهد المنخفض للمقاوم .

ويتم تمييز المقاوم عادة بمقاومته R . وإذا تسبب فرق جهد مقداره V عبر المقاوم فى مرور تيار I خلاله ، فإن المقاومة تعرف بالعلاقة :

$$V = IR \qquad \text{أو} \qquad R = \frac{V}{I} \qquad (18\text{–}2)$$

ووحدة المقاومة هى فولت لكل أمبير ، وتسمى هذه الوحدة أوم (Ω) . وقد اقترح تعريف المقاومة المعبر عنه بالمعادلة 2-18 أول مرة على يد جورج سيمون أوم (1787–1854) ، الذى أوضحت تجاربه أن I تتناسب مع V .

وبناء على هذا فإن المعادلة 2-18 كثيرًا ما تسمى **قانون أوم** . على أن الدقة تستدعى أن ينطبق قانون أوم فقط على المقاومات التى يكون فيها I متناسبًا مع V على مدى معين من قيم V و I . ومثل هذه المقاومات تسمى مقامات **أومية** ، وتتميز بأن الرسم البيانى بين I و V يكون خطًا مستقيمًا كالمبين فى الشكل 7-18 . على أن المقاومة فى كثير من المواد ، كما تُعرِّفها المعادلة 2-18 ؛ ليست ثابتة ، وإنما تعتمد على قيم V و I وتسمى المقاومات فى هذه الحالة **لا أومية** . وتكون الخطوط البيانية للعلاقة بين I و V بالنسبة لهذه المواد الخطية ، كما هو مبين فى الشكل 7-18 .



شكل 7-18:
رسم بيانى لاعتماد التيار على الفولطية المطبقة بالنسبة لمقاومات أومية ومقاومات لا أومية .

مثال توضيحى 2-18

بصيلة مصباح كهربى للجيب تسحب تيارًا مقداره 0.160 A عندما يكون فرق الجهد عبرها 3.10 V . ما هى مقاومة البصيلة ؟

استدلال منطقى : الشكل 5-18 يوضح هذه الحالة ؛ ومن المعطيات أن $V = 3.10$ V عبر المقاوم (وهو فى هذه الحالة فتيل البصيلة) وأن التيار I خلالها هو 0.160 A . وعند استخدام قانون أوم $V = IR$ فإن :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3.10\ \text{V}}{0.160\ \text{A}} = 19.4\ \Omega$$

وسوف نرى فى القسم التالى أن مقاومة البصيلة أقل بكثير لو كانت سخونة فتيلها لم تصل لدرجة الابيضاض ■ .

18-4 المقاومية واعتمادها على درجة الحرارة

إن للأسلاك ذات الحجم والشكل الواحد ولكنها مصنوعة من مواد مختلفة مقاومات مختلفة . فسلك نحاسي ، مثلاً ، مقاومته أقل من مقاومة سلك حديدي له نفس الحجم . ولذلك فإننا بحاجة إلى وسيلة من شأنها تمييز خصائص المقاومة الذاتية للمادة .

ولعمل هذا سنعتبر سلكاً طوله L ومساحة مقطعة المستعرض A كالذى يوضحه الشكل 18-8 . ولعلك خمنت أن مقاومة السلك تزداد بزيادة طوله L ، وتقل إذا زادت A . وقد أوضحت التجارب بالفعل أن ،

$$R \propto \frac{L}{A}$$

ويمكننا إزالة علامة التناسب إذا استخدمنا ثابت التناسب ρ (وهو الحرف اليوناني « رو ») :

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \text{أو} \qquad \rho = R\frac{A}{L} \qquad (18\text{-}3)$$

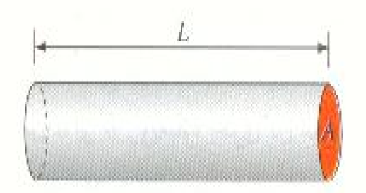
ووحدات ρ هي أوم . متر وتعتمد قيمتها على مادة السلك . ويطلق على ρ مقاومية المادة . وبالنسبة للموصلات ذات التوصيل الكهربي الجيد جدًا كالنحاس فإن ρ تكون صغيرة . ويوضح الجدول 1-18 بعض القيم النموذجية للمقاومية . لاحظ أن القيم المذكورة تخص العوازل (غير الموصلات) وكذلك الفلزات . وتحتوى العوازل كالخشب والزجاج على عدد قليل من الأيونات (وهي عادة ما تكون من الشوائب) التي تؤدى إلى حركة الشحنة عندما يطبق فرق جهد على المادة . ولهذا فإن مقاومية هذه المواد كبيرة جدًا وإن كانت ليست لا نهائية .

ومقاومية مادة ما تتغير بتغير درجة الحرارة . فمقاومة فتيل معدني مثلاً ، في بصيلة مصباح كهربي متوهج تزداد لأكثر من عشرة أضعاف عندما تتغير درجة الحرارة من درجة الغرفة إلى أن يصير الفتيل ساخنًا إلى درجة الابيضاض . ويكون التغير النسبي في المقاومية متناسبًا مع التغير في درجة الحرارة في مدى محدد من درجات الحرارة :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \alpha \Delta T \qquad (18\text{-}4)$$

والمقدار ρ_0 في هذه المعادلة هو المقاومية عند درجة حرارة مرجعية وهي عادة 20°C . أما الثابت α فيسمى **معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة** وهو يعتمد على نوع المادة . والقيم النموذجية الواردة في الجدول رقم 2-18 صحيحة فقط للتغيرات المعتدلة في درجة الحرارة بالقرب من درجة الحرارة المرجعية . وعلى الرغم من أن مقاومية معظم الفلزات تزداد بازدياد درجة الحرارة ، إلا أن العكس هو الصحيح بالنسبة للجرافيت ومعظم أشباه الموصلات (لاحظ الإشارة السالبة في الجدول 2-18) .

وكما يتضح من المعادلة 3-18 ، فإن مقاومة سلك ما تعتمد على أبعاده وعلى المادة التي صنع منها . وهذه الأبعاد تعتمد بدورها على درجة الحرارة كما سبق ودرسنا في



شكل 8-18:
تتناسب مقاومة سلك منتظم طرديا مع طوله L وعكسيا مع A .

جدول 1-18 :
المقاومية عن 20°C

المادة	$\rho(\Omega . m)$
الفضة	1.6×10^{-8}
النحاس	1.7×10^{-8}
الألومنيوم	2.8×10^{-8}
التنجستين	5.6×10^{-8}
الحديد	10×10^{-8}
الجرافيت	3.5×10^{-5}
الدم	1.5
الدهون	25
الخشب	$10^{8} - 10^{12}$
الزجاج	10^{12}
البولى ستيرين	$10^{15} - 10^{19}$

جدول 2-18 :
معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة عند 20°C

المادة	α (لكل °C)
الفضة	0.0038
النحاس	0.0039
الألومنيوم	0.0040
التنجستين	0.0045
الحديد	0.0050
الجرافيت	-0.0005
الجرمانيوم	-0.05
السيليكون	-0.07

الفصل الحادى عشر . على أن معاملات التمدد الحرارى تكون فى العادة أقل بعدة رتب فى المقدار عن معاملات المقاومية الموضحة فى الجدول 2-18 . ولهذا فإن التغيرات الحرارية التى تطرأ على أبعاد القاوم ، يمكن ـ عادة ـ إهمالها إذا قورنت بتغيرات القاومية . ومن ثم نستطيع أن نكتب نفس المعادلة بالنسبة لتغير المقاومة R مع درجة الحرارة لمقاوم محدد مثلما فعلنا مع ρ :

$$\Delta R = R_0 \, \alpha \, \Delta T \qquad (18\text{-}5)$$

وحيث أن المقاومة تتغير مع درجة الحرارة لذا يمكن استعمالها فى قياس درجة الحرارة . وبالفعل فإن مجسات إلكترونية صغيرة تستخدم حاليًا على نطاق واسع كثرمومترات للحمى ـ بناء على هذه الحقيقة . ويستعمل فى هذه الأدوات مقاومات شبه موصلة وهى مواد معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة لها مرتفع بشكل خاص .

مثال توضيحى 3-18

سلك نحاسى من طراز معين تبلغ مساحة مقطعه المستعرض $0.0331\ cm^2$. فما هى مقاومة قطعة منه طولها $40.0\ m$ ؟

استدلال منطقى : سوف نستخدم العلاقة $R = \rho\left(\frac{L}{A}\right)$ حيث $L = 40.0\ m$ و

$A = 0.0331 \times 10^{-4}\ m^2$ و $\rho = 1.7 \times 10^{-8}\ \Omega.m$

$$R = \rho\left(\frac{L}{A}\right) = \frac{(1.7\times10^{-8}\ \Omega.m)(40.0\ m)}{0.0331\times10^{-4}\ m^2} = 0.20\ \Omega$$

قطر هذا النوع من السلك هو الشائع فى أسلاك التوصيل ومنه ترى سبب إهمالنا لمقاومة مثل هذه الأسلاك فى العادة .

مثال 1-18 :

تبلغ مقاومة فتيل بصيلة مصباح إضاءة ، مصنوع من التنجستين $240\ \Omega$ عندما تصل حرارته إلى درجة الإبيضاض (عند نحو $1800°C$) . أوجد المقاومة التقريبية للبصيلة عند درجة حرارة الغرفة $(20°C)$.

استدلال منطقى :

1

سؤال : ما هى المعادلة التى تربط بين التغير فى المقاومة مع تغير درجة الحرارة ؟

الإجابة : إنها المعادلة (5-18) .

سؤال : بما أن قيم α فى الجدول 2-18 ثابتة فقط فى مدى محدود لدرجات الحرارة وتنسب كلها لدرجة حرارة تساوى $20°C$ ، فكيف أستطيع أن أجد قيمة α المناسبة لهذا المدى من درجات الحرارة ؟

الإجابة : هذا سؤال جيد . عندما لا توجد قيم للمعامل α المناظرة لدرجات الحرارة المرتفعة فكل ما تفعله هو حساب قيمة تقريبية معتبرًا أن α لا تتغير بشكل محسوس يجعل نتيجة حساباتك لا معنى لها .

سؤال : ما هي قيمة المقاومة المرجعية R_0 في المعادلة 5–18 والتي على أن استخدمها ؟

الإجابة : حيث أن عليك افتراض أن قيمة α هي نفسها التي عند 20°C فإن القيمة المجهولة للمقاومة R عند 20°C هي نفسها المقاومة المرجعية R_0 .

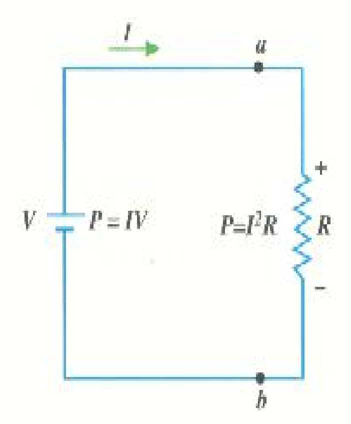
الحل والمناقشة : عند إدخال القيم الواردة في المعادلة 5–18 نحصل على :

$$\Delta R = 240\ \Omega - R_0 = R_0\ (0.0045/°C)\ (1800°C - 20°C) = 8.0\ R_0$$

ومن ثم : $240\ \Omega = 9.0\ R_0$ أو $R_0 = 27\ \Omega$

18–5 القدرة والتسخين الكهربي

عندما تبعث بطارية بتيار خلال مقاوم ، كما في الشكل 9–18 ، فإن البطارية بهذا تمد المقاوم بالطاقة .



شكل 9–18:
تظهر القدرة التي توفرها البطارية كحرارة في المقاوم .

وبالفعل فإن العمليات الكيميائية الداخلية في البطارية تحرك الشحنة من الجهد الكهربي المنخفض عند الطرف السالب إلى الجهد الكهربي المرتفع عند الطرف الموجب . ولكي يتم هذا فإن على البطارية أن تبذل شغلاً على كمية من الشحنة Δq ، يكون مساويًا للزيادة في طاقة الوضع الكهربية للشحنة .

$$W = \Delta \text{EPE} = \Delta q\ V$$

حيث V هي فولطية البطارية . وبمرور الشحنة خلال المقاوم R من النقطة a إلى النقطة b فإنها تفقد الطاقة التي أمدتها بها البطارية مولدة بذلك كمية مساوية من الطاقة الحرارية في المقاوم .

إذا تحركت شحنة مقدارها Δq خلال البطارية (والمقاوم) في زمن مقداره Δt ، فإن القدرة التي تسلمها البطارية تكون حسب المعادلة 2–5 هي

$$\text{القدرة} = \frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{\Delta q V}{\Delta t}$$

ولكن $\Delta q/\Delta t$ ليست سوى التيار المار في الدائرة ، ومن ثم تكون القدرة التي يقدمها مصدر للفولطية V عندما يعمل على إمرار تيار I هي

$$\text{القدرة} = IV \qquad (18\text{–}6)$$

وعند مرور الشحنات خلال المقاوم ، فإنها تهبط خلال فرق للجهد مقداره V . وبناء عليه فإن المعادلة 6–18 تعطينا أيضًا القدرة الكهربية المفقودة داخل المقاوم . وبالتالي يكون لدينا العلاقة التالية لفقد القدرة الكهربية بالنسبة لتيار I يمر خلال المقاوم R :

$$\text{القدرة المفقودة داخل المقاوم} = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \qquad (18\text{–}7)$$

حيث أمكن كتابة هذه العلاقة باستخدام $V = IR$.

وقد تعلمنا فى القسم 2-5 أن وحدة القدرة هى جول لكل ثانية وهى الوحدة المسماة وات (W) ولعلنا معتادون على استخدام هذه الوحدة فى الكهرباء لأننا نقرأها على مصابيح الإضاءة والأجهزة الكهربائية فلو أنك فحصت بصيلة إضاءة مقدارها W 60 مثلا . لوجدت مطبوعا عليها « 60 W, 120 V » . ومعنى هذا أن البصيلة تستهلك W 60 من القدرة عندما يطبق عليها جهد مقداره V 120 . ومن الأمثلة الأخرى المدفأة الكهربائية المكتوب عليها W 1500 والتى تستخدم عند جهد مقداره V 120 . وحيث أن القدرة هى شغل مبذول فى وحدة الزمن فإن مدفأة الأماكن ستوفر حرارة مقدارها J 1500 كل ثانية عند تشغيلها بفرق جهد مقداره V 120 .

وتستمد الطاقة الكهربية اللازمة لتشغيل الأجهزة المنزلية المختلفة من محطات التوليد التى تديرها شركات القوى التى تتقاضى منا لما نستهلكه من طاقة مقدرة بوحدات الكيلو وات ساعة (kWh) ، ولابد إنك تذكر من القسم 2-5 أن وحدة الطاقة التى تستخدمها شركات القوى الكهربائية ، وهى كيلو وات ساعة تكافئ 3.6×10^6 J .

وتوضح لنا المعادلة 6-18 أن الوات ، بالمصطلحات الكهربية هو حاصل ضرب الأمبير فى الفولت . ولذا فإن التيار الذى يسحبه جهاز ما يمكن حسابه بسرعة بمعرفة جهد التشغيل والقدرة المستهلكة :

$$I = \frac{P}{V}$$

ومصباح الإضاءة ذو البيانات 100 W, 120 V يسحب تيارًا مقداره :

$$I = \frac{100\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 0.83\ \text{A}$$

أما المحرك الذى قدرته حصان واحد (1 hp) أو (746 W) ويعمل عند جهد مقداره 120 V فيسحب تيارًا مقداره

$$I = \frac{746\ \text{W}}{120\ \text{V}} = 6.2\ \text{A}$$

وسوف نقدم المزيد من المناقشة عن أهمية التيار المسحوب بواسطة الأجهزة فى القسم 18-11 .

مثال توضيحى 4-18

ما مقدار الحرارة التى تولدها بصيلة مصباح كهربائى W 40 فى 20 min ؟

استدلال منطقى :

بما أن القدرة هى الشغل المبذول فى وحدة الزمن فإن البصيلة تولد J 40 من الحرارة كل ثانية . وعلى هذا يتولد فى 20 min حرارة تساوى :

الحرارة = (40 J/s) (20 min) (60 s/min) = 478,000 J

تمرين : كم عدد السعرات لهذا القدر من الحرارة ؟ **الإجابة** : **11,500 cal** .

مثال 18-2 :

عند تحضير ثمانية أكواب (نحو 1.6 kg) من القهوة يلزم رفع درجة حرارة الماء من 20°C إلى نحو 90°C . افترض أن جهاز صنع القوة الذى تستعمله قدرته 700 W . فما الفترة الزمنية اللازمة لتحضير القوة ؟ وإذا كان 1 kWh يكلف نحو 0.10 $ فكم تكون تكلفة الطاقة المستخدمة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما علاقة الزمن بهذه المسألة ؟

الإجابة : إن تقدير 700 W يعنى أن جهاز تحضير القهوة قادر على إمداد الطاقة بمعدل 700 J/s .

سؤال : ما مقدار الطاقة اللازمة لإنجاز هذا العمل ؟

الإجابة : تذكر العلاقة بين الكتلة وتغير درجة الحرارة وكمية الحرارة والواردة بالمعادلة 11-1 .

كمية الحرارة Q = الكتلة m × الحرارة النوعية $c \times \Delta T$

والحرارة النوعية للماء هى 1 kcal/kg.°C .

سؤال : كيف يمكننى التحويل من kcal إلى J (جول) ؟

الإجابة : استخدم المكافئ الميكانيكى للحرارة (الفصل 11) :

$$1\ \text{kcal} = 4184\ \text{J}$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تحدد زمن تحضير القهوة ؟

الإجابة : القدرة = $\frac{\text{الطاقة}}{\text{الزمن}}$ ، ولهذا فإن :

$$\text{الزمن} = \frac{\text{الطاقة اللازمة}}{\text{القدرة}}$$

سؤال : ما هى العلاقة بين الزمن والتكلفة ؟

الإجابة : إن الدفع يكون عادة على أساس الكيلووات ساعة . وعليك بضرب قدرة الأداة (0.700 kW) فى الزمن الذى تعمل فيه (بالساعات) لكى تجد عدد وحدات الكيلووات ساعة .

الحل والمناقشة : الطاقة اللازمة هى

$$(1.6\ \text{kg})(1\ \text{kcal/kg. C°})\ (70\ \text{C°}) = 112\ \text{kcal}$$

وهذا المقدار يكافئ

$$(112\ \text{kcal})\ (4184\ \text{J/kcal}) = 4.7 \times 10^5\ \text{J}$$

وإذا كان معدّل التحضير 700 J/s فإن زمن التحضير يكون

$$t = \frac{4.7 \times 10^5\ \text{J}}{700\ \text{J/s}} = 671\ \text{s} = 11.2\ \text{min}$$

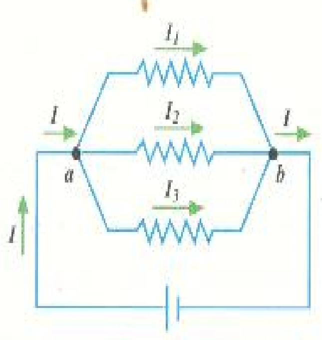
أو ما يساوى 0.187 h .

ولحساب التكلفة لابد أولاً من حساب عدد وحدات kWh من الطاقة المستهلكة :

عدد وحدات kWh = (0.187 h) (0.700 kW) = 0.13 kWh

فإذا كانت التكلفة 0.10 $ لكل kWh فإن التكلفة تكون نحو 1.3 سنت .

18-6 قاعدة النقطة لكيرتشوف



شكل 18-10:
تنص قاعدة النقطة لكيرتشوف على أن :
$I = I_1 + I_2 + I_3$

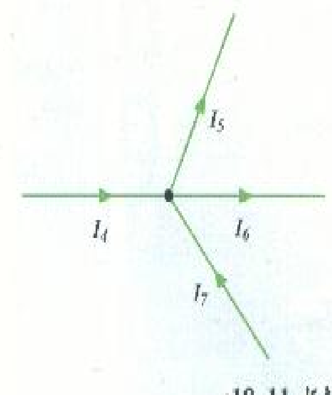
لقد ناقشنا حتى الآن التيار المار فى سلك منفرد ، حيث لابد للشحنة أن تسرى خلال نفس المسار . وقد أشرنا فى القسم 18-2 إلى المسار الذى يسمح للتيار بالمرور فيه **بالدائرة الكهربية** . على أن الدوائر قد يكون بها أكثر من مسار تتبعه التيارات . ويبين الشكل 18-10 دائرة تستطيع الشحنات فيها أن تسلك أى مسار من ثلاثة فيما بين النقطتين a و b . وهذه الدوائر أكثر تعقيداً من دوائر العروة المنفردة . ويتطلب تحليلها استخدام قاعدتين أساسيتين تسميان **قاعدتا كيرتشوف** . وهما واضحتان تماماً ومن السهل فهمهما .

وللتعرف على القاعدة الأولى ، اعتبر النقطة a فى الشكل 18-10 ، حيث يدخلها التيار I ، بينما تخرج منها التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 . وترتبط بين هذه التيارات علاقة بسيطة ، حيث يتطلب قانون بقاء الشحنة أن الشحنة لا توجد من العدم كما أنه لا يمكن تدميرها عند أية نقطة كهذه . والتيار الداخل إلى النقطة يتفرع ببساطة إلى مختلف المسارات المتاحة . ولو أنك جمعت كل التيارات الخارجة من النقطة فلابد أن تحصل على نفس مقدار التيار الكلى الداخل إلى النقطة . وفى حالة الشكل 18-10 فإن هذا يعنى :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

ولابد لهذا المبدأ أن يظل صحيحاً بغض النظر عن مدى تعقيد النقطة أو موقعها . وتسمى هذه الملاحظة البسيطة **قاعدة النقطة لكيرتشوف :**

إن مجموع كل التيارات الداخلة إلى نقطة لابد وأن يساوى مجموع كل التيارات الخارجة من تلك النقطة .



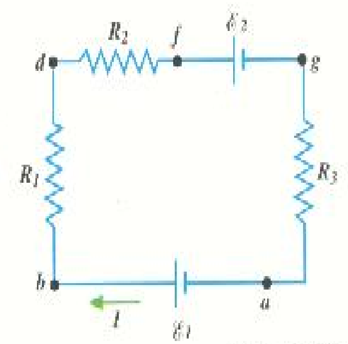
شكل 18-11:
طبقاً لقاعدة النقطة فإن :
$I_4 + I_7 = I_5 + I_6$

وقاعدة النقطة على جانب كبير من الأهمية عند **تحليل الدوائر** ، حيث يكون الهدف النهائى هو معرفة قيم التيارات المارة فى كل من المسارات الممكنة بالدائرة . والخطوة الأولى فى تحليل الدوائر التى بها أكثر من مسار ممكن للتيار أو ، **فرع** ، هو بتحديد رمز للتيار فى كل فرع منفصل فى مخطط الدائرة . وعليك أيضاً أن تحدد إتجاهاً لكل من هذه التيارات حتى تتمكن من تطبيق قاعدة النقطة على كل نقطة يتفرع عندها التيار . ويوضح الشكل 18-11 مثلاً ، نقطة تتضمن أربعة أفرع . وبالنسبة للتيار المرقمة كما فى الشكل فإن قاعدة النقطة تنص على أن $I_4 + I_7 = I_5 + I_6$. والنقطة المهمة الواجب إدراكها هى أن **تياراً واحداً فقط هو الذى يمكن أن يوجد فى فرع ما** ، وأن

الشحنة لابد أن تسرى ، إما فى اتجاه ما أو فى عكسه بين نقطتين . ولو حدث أن قمت بتمييز تيار ما فى الاتجاه المضاد لاتجاهه الحقيقى ، فإن أسوأ ما يمكن أن يحدث أن نتيجة الحل لذلك التيار ستكون رقمًا سالبًا .

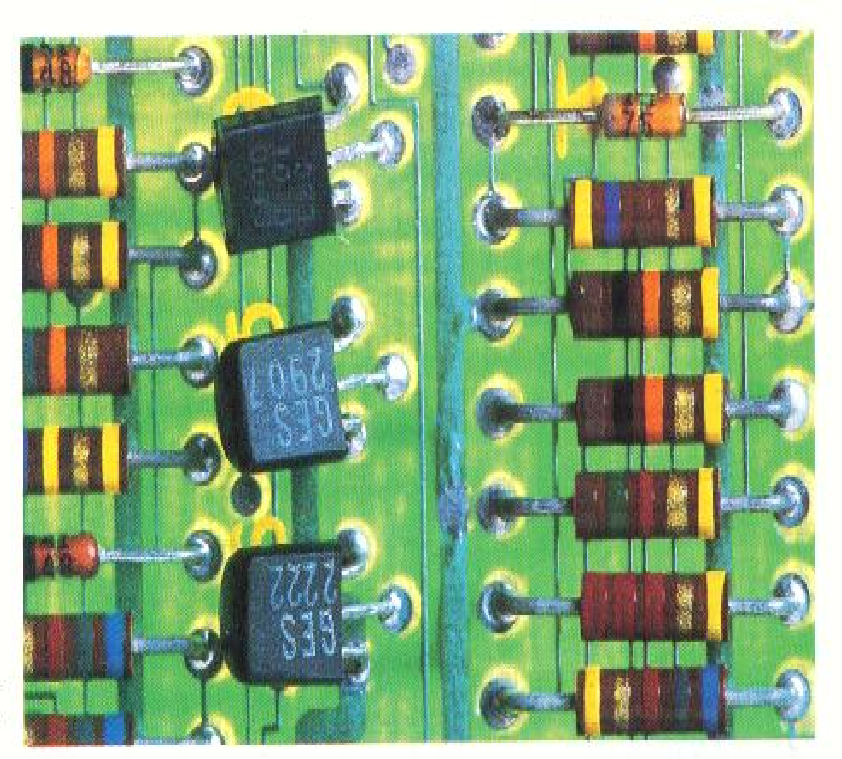
18-7 قاعدة العروة لكيرتشوف

ولكى نفهم القاعدة الثانية لكيرتشوف سنتدبر عروة منفردة من دائرة كما هو مبين فى الشكل 12-18 ، حيث يمر تيار مستمر I فى الاتجاه الموضح . وفى هذه الظروف المستقرة نستطيع أن نحلل تغيرات الجهد إزاء انتقال الشحنة خلال الدائرة .



شكل 12-18:
ما هو قول قاعدة العروة لكيرتشوف فى هذه الدائرة ؟

وسنبدأ عند النقطة a ، ونتتبع حركة شحنة Δq خلال النقط b ، d ، f و g حتى نرجع إلى a مرة أخرى . وسوف تتلقى الشحنة دفعة من الطاقة مقدارها $\Delta q\mathscr{E}_1$ عند مرورها خلال البطارية الأولى من الطرف السالب إلى الطرف الموجب . ثم تفقد طاقة لما تولده من حرارة عند مرورها خلال R_1 و R_2 و R_3 . كما أنها تفقد طاقة وضع عندما تمر عكسيًا (من الطرف الموجب إلى الطرف السالب) خلال البطارية $\mathscr{E}_2$. ومن مقتضيات بقاء الطاقة أن الكسب والفقد فى الطاقة يتوازيان عندما تعود الشحنة إلى نقطة البداية a . والتيار المستمر (dc) ، الذى هو معدل سريان الشحنة ، ثابت ، ومعنى هذا أن الشحنة لا تستطيع أن تجنى أو تخسر مقدارًا صافيًا من الطاقة بمجرد مرورها بالعروة مرارًا وتكرارًا لأنه من أين يتأتى للطاقة الزائدة أن تتولد وإلى أين تنصرف ؟



يستخدم العديد من المقاومات فى تشكيلات معقدة فى دوائر الأجهزة الحديثة .

وهكذا فإن الشحنة Δq سيكون لها فى كل نقطة فى الدائرة قيمة معينة لطاقة الوضع الكهربية . وهذا - بدوره - يعنى أن لكل نقطة مقدارًا محددًا من الجهد الكهربى بالنسبة لنقطة بداية معينة . فإذا بدأنا وانتهينا عند نفس النقطة فى الدائرة ، فإننا نعود إلى

نفس قيمة الجهد وتلخص **قاعدة العروة لكيرتشوف** هذه الحقيقة :

لابد أن يكون المجموع الجبرى لتغيرات الفولطية (فروق الجهد) حول أية عروة مقفلة في دائرة ما صفرًا .

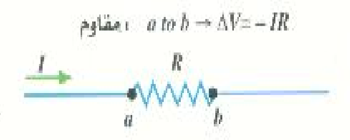
وكما نلاحظ فإن قاعدة العروة وثيقة الصلة بارتفاعات وانخفاضات الجهد ولهذا السبب سنحاول التعرف على ما يحدث للجهد عندما نتحرك عبر مقاوم وبطارية ومكثف .

افترض أننا نتحرك من a إلى b من خلال المقاوم المبين في الشكل 13-18 . ونعلم أن اتجاه التيار يكون دائمًا من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض خلال مقاوم ما ، وعلى ذلك يكون التغير من a إلى b هو انخفاض في الجهد ، ومن ثم تكون إشارته سالبة أما مقداره فيكون IR حسبما ينص قانون أوم . أى أن التغير في الجهد عند التحرك من a إلى b سيكون $-IR$.

ويدل رمز البطارية على أن الجانب الأيسر للبطارية في الشكل 13-18 موجب . ولهذا تكون النقطة a عند جهد أعلى من جهد النقطة b بمقدار $\mathscr{E}$ فولت أى أن الحركة من a إلى b يصحبها تغير في الجهد هو $-\mathscr{E}$.

أما بالنسبة للمكثف فلابد أن اللوح a هو الموجب ، أى أنه عند الجهد الأعلى وحيث أن فرق الجهد عبر المكثف يعطى بالمعادلة 6-17 على صورة q/C لذا يكون تغير الجهد عند الانتقال من a إلى b هو $-q/C$. ومن الطبيعي أن أمرًا آخر لابد أن يكون واضحًا فيما يتعلق بفرع دائرة ما ، يكون محتويًا على مكثف . فالمكثف لا يسمح للتيار المستمر (dc) بالمرور من خلاله . وعلى ذلك فأى فرع من فروع الدائرة يكون به مكثف لن يمر به تيار مستمر . والتغير في الجهد في كل من هذه الحالات الثلاث يكون سالبًا عند الانتقال من a إلى b . أما إذا كان الانتقال من b إلى a فإن التغير يكون موجبًا . والجدول 3-18 يلخص نتائجنا هذه .

وسنقوم الآن باستخدام قاعدة العروة في بعض الدوائر البسيطة قبل الانتقال إلى تطبيقاتها الأكثر صعوبة .



بطارية : a to b → $\Delta V = -\mathscr{E}$

مكثف : a to b → $\Delta V = -q/C$

شكل 13-18:
في كل من الحالات التى بالشكل يكون الانتقال من a إلى b متمثلا في انخفاض للجهد ، أى تغير سالب للجهد (الفولطية) . أما الانتقال من b إلى a فيعبر عن تغير موجب للجهد .

جدول 3-18 :
تغيرات الجهود عبر عناصر الدائرة في دوائر التيار المستمر.

1 ـ مقاومات	
أ ـ في اتجاه التيار	$V = -IR$
ب ـ في عكس اتجاه التيار	$V = +IR$
2 ـ مصادر القوة الدافعة الكهربية $\mathscr{E}$	
أ ـ عبر (emf) من الطرف − إلى الطرف +	$V = +\mathscr{E}$
ب ـ عبر (emf) من الطرف + إلى الطرف −	$V = -\mathscr{E}$
3 ـ مكثفات تحمل شحنة q	
أ ـ عبر C من اللوح + إلى اللوح −	$V = -q/C$
ب ـ عبر C من اللوح − إلى اللوح +	$V = +q/C$
جـ ـ في أى فرع يحتوى على مكثف	$I = 0$

مثال توضيحي 5-18

أوجد التيار المار في الدائرة الموضحة في الشكل 14-18 .

استدلال منطقى : دعنا نخمن أن التيار يمر في الاتجاه المبين بالشكل . (وإذا تذكرنا من القسم 2-18 أن التيار يتدفق من الطرف الموجب ، فقد تعترض بأن تخميننا خاطئ لأن البطارية التى قوتها 12 V سيكون لها بالتأكيد تأثير أقوى على التيار من البطارية التى قوتها 3 V ، على أن أحد الأمور اللطيفة فيما يتعلق بقاعدتي كيرتشوف هى أنه حتى من لا يجيد التخمين الصائب قادر على استعمالها كما سنرى بعد قليل) . سنقوم الآن باختيار نقطة مثل a كبداية وننطلق منها حول الدائرة . وتكون التغيرات في الجهد كما يلى :

$a \to b \quad +3\ V$

$b \to c \quad -I(5\ \Omega)$

$c \to d \quad -12\ V$

$d \to e \quad 0\ V$

$e \to f \quad -I(6\ \Omega)$

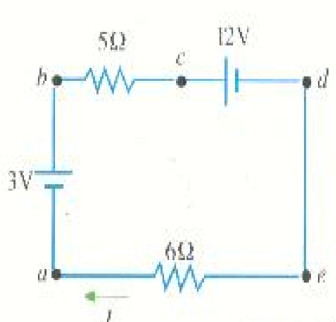
(من المهم جدًا أن تفهم اختيار الإشارة المستخدمة في كل حد) وطبقًا لقاعدة العروة ، فإن المجموع الجبرى لتغيرات الجهد هذه لابد وأن يساوى الصفر :

$$3 - I(5\ \Omega) - 12 - I(6\ \Omega) = 0$$

وعند حل هذه المعادلة بحثًا عن I سنجد أن $I = -\frac{9}{11} A$. وتدلنا الإشارة السالبة أن تخميننا حول اتجاه التيار كان خاطئًا في البداية . وليست هناك مشكلة في ذلك . لأن التيار $\frac{9}{11} A$ سيكون في اتجاه معاكس لتخميننا .

افترض الآن أننا نختار التيار I يمر في الاتجاه المعاكس . وإذا تحركنا عندئذ حول الدائرة في نفس اتجاه الحركة السابق ، فإن **إشارات التغيرات المختلفة في الجهود عبر المقاومات ستنعكس** (القاعدة 1b في الجدول 3-18) . وسيمر التيار خلال المقاوم في اتجاه تناقص V وستكون معادلتنا في هذه الحالة هي

$$+3 + I(5\ \Omega) - 12 + I(6\ \Omega) = 0$$



شكل 14-18:
عند تعيين مقدار التيار في هذه الدائرة ، فكيف تدل الإجابة التى حصلنا عليها على أننا قد اخترنا التيار I في الاتجاه الخاطئ ؟

وحل هذه المعادلة الآن هو $I = +\frac{9}{11} A$. مما يدل على اختيار صحيح لاتجاه التيار .
لاحظ أن الطريق الذى تسلكه للحركة حول العروة لن تشكل أى فرق في حساب تغيرات الجهد . فعند اختيارك لاتجاه التيار ستحصل على نفس الإجابة . إذا اخترت الاتجاه العكسى للتيار فإن الإشارة التى ستنتج في الحل ستكون معكوسة . ونفترض بطبيعة الحل أنك قد اخترت الإشارة الصحيحة لكل تغير في الجهد .

تمرين : أوجد قيمة I لو عكست أقطاب البطارية التى قوتها 3 V . **الإجابة : A 1.36-** .

مثال 3-18

أوجد التيارات في جميع أفرع الدائرة المبينة في الشكل 15-18 .

استدلال منطقى :

سؤال : كم عدد المعادلات المستقلة التى احتاجها ؟

الإجابة : إنك دائمًا بحاجة إلى عدد من المعادلات المستقلة بقدر ما لديك من كميات مجهولة في المسألة . وفي هذه الحالة ، فإن كل العناصر في الدائرة متاحة فيما عدا التيارات المارة في الأفرع الثلاثة . ولذلك ستحتاج إلى ثلاث معادلات حتى تتمكن من تعيين هذه التيارات .

سؤال : ما هي المعادلة التى أحصل عليها من قاعدة النقطة ؟

الإجابة : النقطتان a و c ستقدمان لك نفس المعادلة :

$$I_3 = I_1 + I_2$$

لاحظ أن I_1 يسرى من a خلال d إلى داخل c ، أما I_3 فيسرى من c خلال b إلى داخل a ، و I_2 يسرى من a إلى c .

سؤال : أى عروة على أن أختار أولاً وفى أى اتجاه لابد وأن أتحرك حولها ؟

الإجابة : اختر أية عروة مقفلة . ثم تحرك حولها فى أى من الاتجاهين . فقط لابد من العناية القصوى فى تطبيق الإشارات بشكل متوافق فى كل مرة يواجهك تغير فى الجهد .

سؤال : ما هى المعادلة التى تقترحها قاعدة العروة عندما أتحرك حول العروة $acda$ ؟

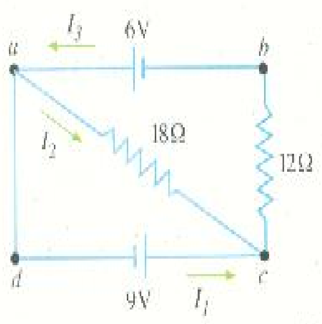
الإجابة : إنك تفقد جهدًا مقداره $I_2(18\ \Omega)$ عند الانتقال من a إلى c كما أنك تفقد $9\ V$ عبر (emf) عند الانتقال من c إلى d . ومن ثم :

$$-I_2(18\ \Omega) - 9\ V = 0$$

سؤال : كيف أتعامل مع التيار I_1 فى المسار cda ؟

الإجابة : هذا المسار لا يمر من خلال مقاوم ولهذا لا يوجد تغير IR فى الجهد . وعند تطبيق قاعدة العروة عند الانتقال عبر (emf) ، عليك بحساب قيمة (emf) بغض النظر عن التيار المار فيها . ولذلك لن يظهر I_1 فى معادلات قاعدة العروة ، وإن كانت ستظهر فى معادلة قاعدة النقطة .

(فى قسم لاحق سنعدل هذا لكى تأخذ مقاومة البطارية فى الاعتبار) .



شكل 15-18:
عين قيمة التيار فى كل من أفرع الدائـرة الثلاثة .

سؤال : كيف أحصل على معادلة ثالثة ؟

الإجابة : إنك لم تأخذ بعد الفرع abc فى الاعتبار ولذا تحتاج إلى معادلة عروة أخرى تتضمنه .

سؤال : إذا سرت حول العروة $abca$. فما هى المعادلة التى تقدمها لى قاعدة العروة ؟

الإجابة : إنك تفقد $6\ V$ عند الانتقال من a إلى b . وتكسب جهدًا مقداره $I_3(12\ \Omega)$ من b إلى c (إنك تكسب لأنك تسير فى عكس اتجاه I_3) . وتكسب $I_2(18\ \Omega)$ من c إلى a لنفس السبب .

$$-6\ V + I_3(12\ \Omega) + I_2(18\ \Omega) = 0$$

الحل والمناقشة : ستقدم لك قاعدتا كيرتشوف - بشكل عام - عددًا من المعادلات التى تحتوى كل منها على مجهول واحد . وحيث أن مجهولين أو أكثر لا يمكن تحديدهما من معادلة منفردة فإن هذه **المعادلات الآنية** لابد أن تعالج حتى تصل إلى معادلة منفردة تختفى منها كل المجاهيل ولا يتبقى سوى مجهول واحد . وقد تكون هذه عملية شاقة وتتطلب انتباهًا حريصًا لقواعد الجبر .

وفى هذه الحالة ، تحتوى أول معادلة عروة على مجهول واحد فقط . ولذا يمكن حلها مباشرة :

$$-18\, I_2 = 9 \quad , \quad I_2 = -0.50\ A$$

والإشارة السالبة هنا تدل على أن الاتجاه الفعلي للتيار I_2 هو عكس التخمين الخاطئ في الشكل 15-18 .

ويمكننا الآن التعويض بقيمة I_2 في معادلة العروة الثانية :

$$-6 + 12 I_3 + (-0.50)(18) = 0 \quad , \quad I_3 = +1.25 \text{ A}$$

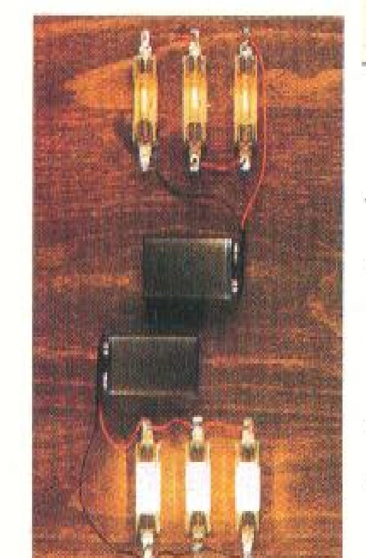
(تأكد من أنك لاحظت التوافق في استخدام إشارة I_2) . والإشارة الموجبة في هذه الإجابة تدلنا على أن اتجاه I_3 المبين في الشكل 15-18 صحيح . أما معادلة قاعدة النقطة فتؤدي إلى معرفة قيمة I_1 :

$$I_1 = I_3 - I_2 = 1.25 - (-0.50 \text{ A}) = +1.75 \text{ A}$$

إن الحاجة إلى ملاحظة الإشارات بشكل صحيح لا يمكن أن تكون من قبل المغالاة في التأكيد .

تدريب : أوجد I_2 و I_3 لو عكست أقطاب البطارية التي قوتها 9 V .

الإجابة : 0.500 A , -0.25 A



وصلت ثلاث بصيلات للإضاءة بنفس مصدر الجهد . . البصيلات المتصلة على التوازي تتوهج أكثر سطوعا من تلك المتصلة معًا على التوالي . لماذا ؟

18-8 المقاومات المتصلة على التوالي وعلى التوازي

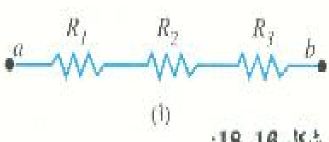
لقد تعرفنا في الفصل السابع عشر على طريقتين لتوصيل المكثفات معًا ، على التوازي وعلى التوالي . وسنفحص الآن المقاومة الكلية المكافئة التي تنتج عندما تتصل مجموعة من المقاومات معًا بنفس التشكيلات .

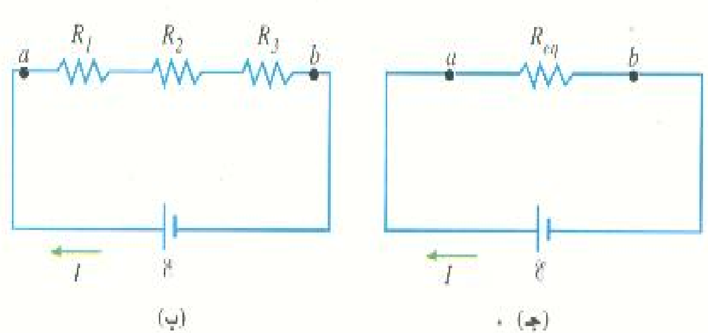
ويوضح الشكل 16-18 (أ) ثلاثة مقاومات متصلة معًا على التوالي وعندما تتصل ببطارية كما في الشكل 16-18 (ب) فإن تيارًا ما I سيمر ونستطيع عمل الملاحظات التالية بناء على ما قد تعلمناه :

المقاومات على التوالي

1 يمر نفس التيار I خلال جميع المقاومات المتصلة على التوالي .

2 تكون انخفاضات الجهد عبر المقاومات هي IR_1 ، IR_2 و IR_3 ....





شكل 16-18:
تتصل المقاومات الثلاثة معا على التوالي والمقاومة المكافئة هي: $R_{eq} = R_1+R_2+R_3$.

وتعطينا قاعدة العروة لكيرتشوف عند تطبيقها على هذه الدائرة البسيطة ما يلي :

$$\mathscr{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = 0$$

ومن ثم

$$\mathscr{E} = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

وهدفنا هو إيجاد المقاومة المكافئة Req التـى يمـر خلالـها نفس التيـار I لـو أنـها وُصِّلت إلى نفس البطارية في الشكل 16-18 (جـ) . وقانون أوم يعطى عنـد تطبيقـه على هذه الدائرة :

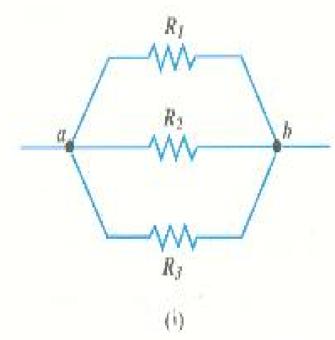
$$\mathscr{E} = I R_{eq}$$

بمقارنة هاتين المعادلتين المعبرتين عن $\mathscr{E}$ نجد أن :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

ويمكن تعميم هذه النتيجة بالنسبة لأى عدد n من المقاومات المتصلة على التوالى :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n \quad \text{على التوالى} \qquad (18\text{–}8)$$

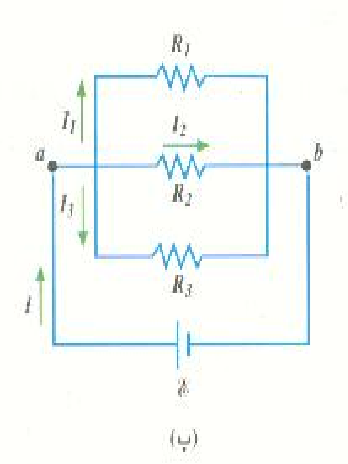


(أ)

يوضح الشكل 17-18 (أ) ثلاثة مقاومات متصلة معًا على التوازى ، وعند توصيلـها مع مصدر للقوة الدافعة الكهربية (emf) فإن نفس الفولطية (فرق الجهد) يكون مطبقًا عـبر كل منها . ومرة أخرى نستطيع تطبيق ما تعلمناه لتونا لكي نستنتج ما يلى :



المقاومات على التوازى



(ب)

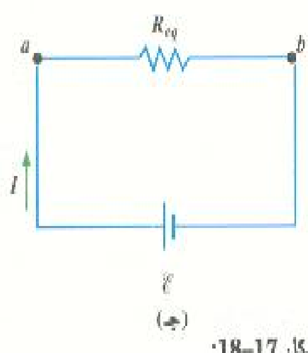
1 يكون فرق الجهد $\mathscr{E}$ عبر كل من المقاومات المتصلة معًا على التوازى هو نفسه .

2 يتعين التيار المار فى كل مقاوم متصل مع آخرين على التوازى من العلاقة :

$I_1 = \mathscr{E}/R_1$ ، $I_2 = \mathscr{E}/R_2$ . . . إلخ

وطبقًا لقاعدة النقطة لكيرتشوف فإن :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{\mathscr{E}}{R_1} + \frac{\mathscr{E}}{R_2} + \frac{\mathscr{E}}{R_3}$$



(جـ)

شكل 17-18: تتصل المقاومات الثلاثة معًا على التـوازى . والمقاومة المكافئة هى $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$

ومرة أخرى نود أن نحدد قيمة R_{eq} التى تسحب تيارًا I من القـوة الدافعـة الكهربيـة $\mathscr{E}$ مساويًا للذى تسحبه المقاومات المتصلة على التوازى . أى أن

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_{eq}} = \frac{\mathscr{E}}{R_1} + \frac{\mathscr{E}}{R_2} + \frac{\mathscr{E}}{R_3}$$

مما يؤدى مباشرة إلى

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

وتعميم هذه القاعدة على عدد n من المقاومات المتصلة على التوازى هو :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \ldots + \frac{1}{R_n} \quad \text{على التوازى} \qquad (18\text{–}9)$$

ومن المثير ملاحظة أن المقاومات المتصلة على التوالى تتحد بنفـس الطريقـة التـى تفعلـها المكثفات المتصلة على التوازى والعكس صحيح . إن عليك ـ مـرة أخـرى ـ تذكـر مراعـاة الدقة عند جمع المقلوبات .

مثال توضيحى 6-18

أوجد التيار I المار خلال البطارية فى الشكل 18-18 (أ) .

استدلال منطقى : قد نستطيع حل هذه المسألة بتطبيق قاعدتى كيرتشوف على دائرة كالمبينة فى الجزء (أ) . على أنه يكون من الأبسط عادة أن ندمج المقاومات المتصلة معًا على التوالى وعلى التوازى قبل كتابة معادلات العروة وسنبدأ بدمج المقاومين اللذين بين النقطتين b و c :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} = \frac{3}{6} \qquad , \qquad R = 2\,\Omega$$

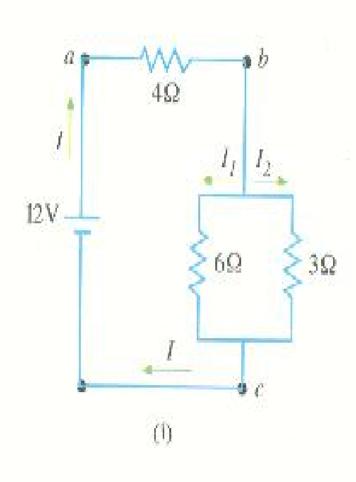
ويوضح الشكل 18-18 (ب) الآن الدائرة المكافئة .

حيث دمج المقاومان المتوازيان فى مقاوم واحد . ومن الواضح الآن أن المقاوم $4\,\Omega$ والمقاوم $2\,\Omega$ متصلان على التوالى بين a و c ومقاومتهما المكافئة هى

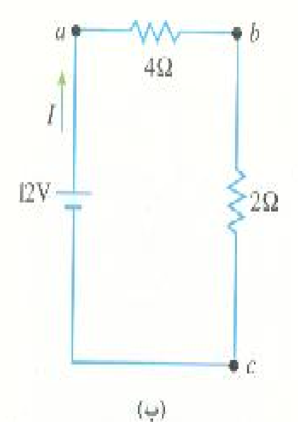
$$R\,eq = 4\,\Omega + 2\,\Omega = 6\,\Omega$$

والدائرة المكافئة الجديدة مرسومة فى الجزء (جـ) من الشكل . وقد أصبح الموقف الآن صالحاً لتطبيق قانون أوم . إن فرق الجهد عبر المقاوم $6\,\Omega$ هو $12\,V$ ومن ثم :

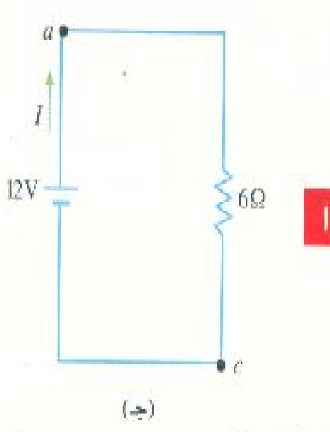
$$I = \frac{V}{R} = \frac{12V}{6\Omega} = 2\,A$$



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 18-18: المقاومان المتوازيان بين b و c يكافئان مقاوم $2\,\Omega$ كما فى الشكل (ب) . والمقاومان اللذان على التوالى فى (ب) يمكن دمجهما كما فى (جـ) .

مثال 4-18 :

أوجد التيار المار خلال البطارية فى الشكل 19-18 (أ) .

استدلال منطقى :

سؤال : على أى شىء يعتمد التيار خلال البطارية ؟

الإجابة : بما أن $V = IR$ ، فلابد أن يعتمد التيار على فولطية البطارية (6 V) والمقاومة الكلية بين النقطتين a و d .

سؤال : ما هى المقاومة المكافئة بين النقطتين c و d ؟

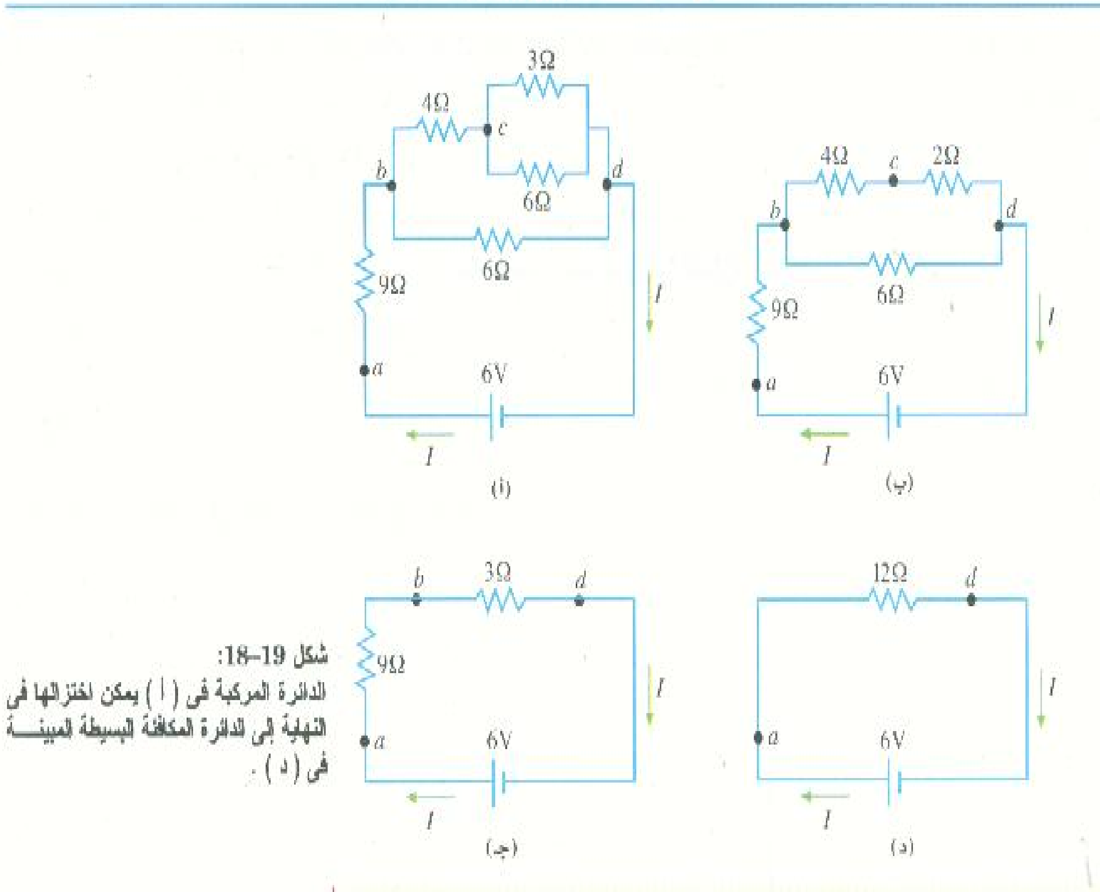
الإجابة : المقاومتان متصلتان على التوازى .

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} \qquad , \qquad R_{cd} = 2\,\Omega$$

سؤال : ما هى المقاومة المكافئة بين b و d ؟

الإجابة : المقاومان $4\,\Omega$ و $2\,\Omega$ متصلان على التوالى مما يعنى أنهما يكافئان مقاومًا $6\,\Omega$. وهذا الأخير متصل على التوازى مع مقاوم آخر $6\,\Omega$. ولهذا

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = \frac{2}{6} \qquad , \qquad R_{bd} = 3\,\Omega$$



شكل 19–18:
الدائرة المركبة فى (أ) يمكن اختزالها فى النهاية إلى الدائرة المكافئة البسيطة المبينة فى (د) .

سؤال : ما هى المقاومة الكلية بين a و d ؟

الإجابة : يتضح من الجزء (جـ) من الشكل أن المقاوم $9\ \Omega$ متصل على التوالى مع المقاومة R_{bd} التى هى $3\ \Omega$. ولذا

$$R_{\text{tot}} = 9\ \Omega + 3\ \Omega = 12\ \Omega$$

الحل والمناقشة : ينص قانون أوم على :

$$I = \frac{V}{R_{\text{tot}}} = \frac{6V}{12\Omega} = 0.50\ \text{A}$$

18-9 مسائل على حل الدوائر

لقد أصبح تحت أيدينا الآن الأدوات اللازمة لحل معظم مسائل دوائر التيار المستمر . وقبل أن تستخدم هذه الأدوات في عدد من الأمثلة ، علينا أن نسرد بعض الحقائق الواجب تذكرها . وعلى الرغم من أن لكل مسألة ملامحها الخاصة بها ، إلا أن المدخل العام التالى يكون مفيدًا دائمًا تقريبًا .

1 ارسم الدائرة .

2 حدد تيارًا (من حيث الرمز والاتجاه) لكل فرع من أفرع الدائرة . واحرص على استخدام رمز واحد للتيار فى فرع معين حتى وإن كان يحتوى على عدة عناصر . وعند كل نقطة التقاء لابد أن تحمل التيارات فى كل فرع رقمًا يختلف عن الآخرين .

3 اختزل المجموعات المتصلة على التوالى وعلى التوازى كلما أمكن ذلك وكلما كان متاحًا .

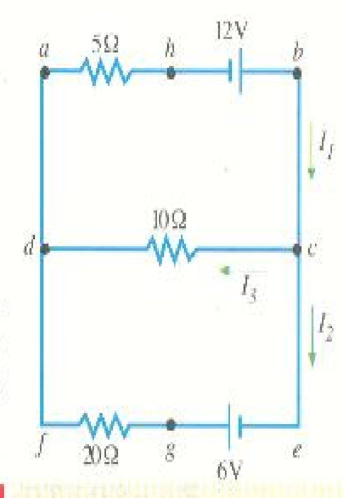
4 اكتب معادلات العروة بالنسبة للدائرة المبسطة ، ولابد أن تحتوى كل معادلة على معلومة من فرع واحد جديد على الأقل .

5 اكتب معادلات النقط بالنسبة لكل نقطة تحتوى على الأقل على تيار واحد جديد .

الخطوتان 4 و 5 يجب أن يتيحا لك عددًا من المعادلات بعدد المجاهيل فى الدائرة . قم الآن بحل هذه المعادلات آنيًا لتحصل على المجاهيل .

مثال 5-18 :

أوجد التيارات الثلاثة فى الدائرة الموضحة فى الشكل 20-18 .



شكل 20-18: دائرة يسهل حلها باستخدام قاعدتى كيرتشوف .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكننى تبسيط أى مجموعة متصلة على التوالى أو التوازى ؟

الإجابة : لا . فالمقاومان فى الفرعين ab و ef ليسا فى اتصال بسيط على التوازى مع cd . إذا يحتوى هذان الفراعان على بطاريات أيضًا .

سؤال : أى معادلات العروة يمكننى كتابتها ؟

الإجابة : إحدى هذه العرى هى $abcda$. فإذا بدأنا عند النقطة a فإن :

$$-I_1(5\ \Omega)+12\ \text{V}-I_3(10\ \Omega)=0 \qquad (1)$$

وهناك عروة أخرى هى $abefa$. فإذا بدأنا عند النقطة a فإن :

$$-I_1(5\ \Omega)+12\ \text{V}+6\ \text{V}-I_2(20\ \Omega)=0 \qquad (2)$$

ويمكن تبسيطها لتصبح

$$-I_1(5\ \Omega)+18\ \text{V}-I_2(20\ \Omega)=0$$

لاحظ أن بعض الحدود فى (2) هى نفس الحدود فى (1) وإن هناك بعض الحدود الجديدة أيضًا .

سؤال : ماذا عن العروة $dcef$ ؟

الإجابة : لن تحتوى معادلة هذه العروة على حدود جديدة ، حيث تشمل المعادلتان (1) و (2) كل عناصر الدائرة .

سؤال : ما هي معادلة النقطة عند c ؟

الإجابة :

$$I_1 = I_2 + I_3 \qquad (3)$$

سؤال : كيف أبدأ فى حل هذه المعادلات الثلاث ؟

الإجابة : ليست لدينا معادلات تحتوى على مجهول واحد فقط ولذا عليك أن تبدأ بإلغاء بعض المجاهيل عن طريق التعويض . استخدم المعادلة (3) ، مثلاً ، للتعويض عن I_1 فى المعادلتين (1) و (2) :

$$-(I_2 + I_3)\,(5\ \Omega) + 12\ \text{V} - I_3(10\ \Omega) = 0 \qquad (4)$$

$$-(I_2 + I_3)\,(5\ \Omega) + 18\ \text{V} - I_2(20\ \Omega) = 0 \qquad (5)$$

ويعطينا دمج الحدود معًا :

$$-I_2(5\ \Omega) - I_3(5\ \Omega) + 12\ \text{V} = 0 \qquad (6)$$

$$-I_2(25\ \Omega) - I_3(5\ \Omega) + 18\ \text{V} = 0 \qquad (7)$$

ويمكن حل المعادلة (6) للحصول على I_2 . بدلالة I_3 :

$$I_2 = 2.4\ \text{V}/\Omega = -3\,I_3$$

وبالتعويض من هذا فى المعادلة (7) والحل بحثًا عن I_3 ، ثم استخدام هذه القيمة فى المعادلة (8) فإننا نحصل على I_2 . وأخيرًا فإن I_1 تنتج من المعادلة (3) .

الحل والمناقشة : عندما تحتفظ بعملك منمقًا ومنهجيًا ، فإنك بذلك تقلل من مخاطر الأخطاء الجبرية التى تحدث عند حل المعادلات الآنية . من المعادلة (7) نجد :

$$-60\ \text{V} + I_3(75\ \Omega) - I_3(5\ \Omega) + 18\ \text{V} = 0, \qquad I_3 = 0.600\ \text{A}$$

ثم تعطينا المعادلة (8) ما يأتى

$$I_2 = 2.4\ \text{V}/\Omega - (0.600\ \text{A})(3) = 0.600\ \text{A}$$

وفى النهاية ، تعطينا المعادلة (3) ،

$$I_1 = 0.600\ \text{A} + 0.600\ \text{A} = 1.200\ \text{A}$$

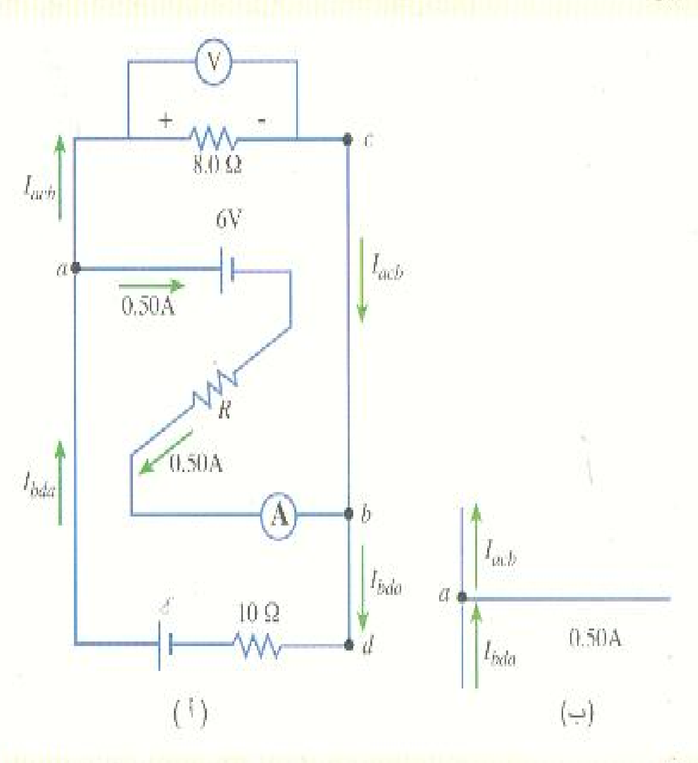
لاحظ أن جميع التيارات ذات قيم موجبة مشيرة بذلك إلى أن اتجاهاتها قد اختيرت بشكل صحيح .

تدريب : احسب فرق الجهد بين النقطتين e و f فى الشكل 20-18 . **الإجابة** : $-6\ \text{V}$.

مثال 6-18 :

تحتوى الدائرة المرسومة فى الشكل 21-18 (أ) على رمزين جديدين هما Ⓥ و Ⓐ

يمثلان فولتميتر وأميتر على الترتيب . وسوف يناقش عمل هذين الجهازين بتفصيل أكبر في القسم 10–18 . أما الآن فعليك اعتبار أن الفولتميتر يقرأ فرق الجهد عبر المقاوم $8.0\ \Omega$ بينما يقرأ الأميتر التيار I_{ab} الذى يسرى فى الفرع ab . وهذه القراءات هى على الترتيب $16\ V$ و $0.50\ A$. وقطبية المقاوم $8\ \Omega$ واتجاه التيار $0.5\ A$ موضحان بالرسم . وسنعتبر وجود الجهازين غير مؤثر إطلاقاً فى عمل الدائرة . أوجد قيم كل من $\mathscr{E}$ ، R ، I_{bda} و I_{acb} كما يشار إليها في الشكل 21–18 (أ) . أما الشكل 21–18 (ب) فيوضح نقطة التقاء التيارات عند a .



شكل 21–18:
قراءة كل من الأميتر والفولتميتر معلومة . ونرغب فى إيجاد I ، R و $\mathscr{E}$.

استدلال منطقي :

سؤال : تحتوى المسألة على أربعة مجاهيل ولذا سأحتاج إلى أربع معادلات لحل المسألة . من أين آتى بكل هذه المعادلات ؟

الإجابة : إن لديك من المعلومات ما يكفى لإيجاد I_{acb} على الفور . ثم عليك تطبيق قاعدتى كيرتشوف على كل نقطة وكل عروة حتى تكون ثلاث معادلات مستقلة .

سؤال : كيف يرتبط التيار I_{acb} بالجهد المقاس عبر المقاوم $8\ \Omega$ ؟

الإجابة : إن فرق الجهد عبر المقاوم هو $V = IR$. وهنا $V = 16\ V$ و $R = 8.0\ \Omega$ ولهذا يكون التيار $I_{acb} = V/R = 2.0\ A$.

سؤال : ما هى نتيجة تطبيق قاعدة النقطة على a ؟

الإجابة : بالرجوع إلى الشكل 21–18 (ب) نجد أن التيار I_{bda} يدخل النقطة a بينما يغادرها التياران I_{acb} و $0.50\ A$. ولذا

$$I_{bda} = 2.0\ A + 0.50\ A = 2.5\ A$$

سؤال : هل أشتق معادلة ثانية إذا استخدمت قاعدة النقطة عند b ؟

الإجابة : إن النقطة b سوف تعطيك نفس المعادلة التى قدمتها لك النقطة a أى أنه لن تظهر بها أية تيارات جديدة .

سؤال : ماذا ينتج عن تطبيق قاعدة العروة على العروة $acba$ ؟

وأيضًا كيف اختار الاتجاه الذى أتحرك فيه حول العروة ؟

الإجابة : يمكنك اختيار أى من الاتجاهين الممكنين لتتحرك حول العروة . فطالما أنك تراعى الإشارات الصحيحة لتغيرات الجهد فإنك ستحصل على نفس النتيجة . فإذا اخترت اتجاه حركة عقارب الساعة مثلاً ، فإنك تحصل على :

$$-16\ \text{V} + (0.50\ \text{A})\,R + 6.0\ \text{V} = 0 \qquad (1)$$

لاحظ أن بهذه المعادلة مجهول واحد فحسب وهو R . وعليك التأكد من أنك تفهم الإشارات .

سؤال : ما العروة التى على اختيارها بعد ذلك ؟

الإجابة : إن أيًا من العروتين المتبقيتين $acbda$ أو $abda$ سوف تكمل المسألة ، لأن جميع أفرع الدائرة حينئذ ستكون قد استخدمت فى المعادلات .

سؤال : ما الذى يتيحه الدوران حول العروة $acbda$ ؟

الإجابة : إذا بدأت من النقطة a فإنك تحصل على :

$$-16\ \text{V} - (I_{bda})\,(10\ \Omega) + \mathscr{E} = 0 \qquad (2)$$

وبما أن قاعدة النقطة قد أعطتك بالفعل قيمة I_{bda} ، فإن هذه المعادلة يمكن حلها للحصول على $\mathscr{E}$.

الحل والمناقشة : فى المعادلة (1) يدخل فرق الجهد عبر R بإشارة موجبة لأننا إذا سرنا حول العروة باتجاه حركة عقارب الساعة فإننا نخترق R فى اتجاه عكس اتجاه التيار ولذا فإننا نسير فى اتجاه زيادة الجهد . والمعادلة (1) تعطينا $R = (10\ \text{V})/(0.5\ \text{A}) = 20\ \Omega$ ، أما المعادلة (2) فتعطينا $\mathscr{E} = 16\ \text{V} + (2.5\ \text{A})\,(10\ \Omega) = 41\ \text{V}$.

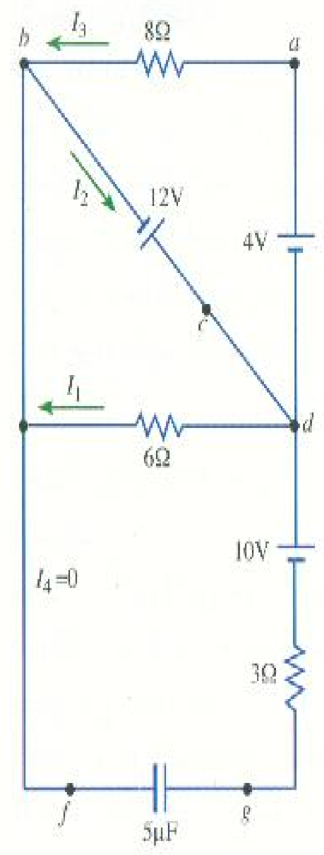
مثال 18-7 :

بالنسبة للدائرة المرسومة فى الشكل 22-18 ، أوجد I_1 ، I_2 ، I_3 والشحنة التى على المكثف .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يظهر المكثف فى قاعدتى كيرتشوف ؟

الإجابة : عندما يتم شحن المكثف فإن التيار لا يستطيع المرور خلال الفرع الذى به المكثف . (لاحظ أن التيار $I_4 = 0$ فى الشكل 22-18) . ومن المعادلة 6-17 فإن فرق الجهد عبر المكثف يرتبط بشحنته بالعلاقة $V = q/C$. وعندما يتم تحليل بقية الدائرة



شكل 22-18:
عندما يكون المكثف مشحونًا تمامًا ، فإن التيار المار خلال السلك السفلي يكون صفرًا ويمكن إهمال هذا الجزء من الدائرة .

فإن بإمكانك أن تجد V ومن ثم q .

سؤال : ماذا تقدم قاعدة النقطة بالنسبة للنقطة d ؟

الإجابة : $I_2 = I_1 + I_3$.

سؤال : ما الذى تقدمه قاعدة العروة بالنسبة للعروة $abcda$ ؟

الإجابة : إذا تحركت فى اتجاه ضد اتجاه حركة عقارب الساعة فإنك تحصل على :

$$-I_3\,(8\ \Omega) + 12\ V + 4\ V = 0 .$$

ومن ثم $I_3 = 2.00\ A$

سؤال : ما الذى تعطيه العروة $badeb$ ؟

الإجابة : إذا تحركت فى اتجاه حركة عقارب الساعة فإن :

$$+(2.00\ A)\,(8\ \Omega) - 4\ V - I_1(6\ \Omega) = 0$$

ولذا $I_1 = 2.00\ A$.

سؤال : ما هى المعادلة التى تعطينى I_2 ؟

الإجابة : إنها قاعدة النقطة . فالنقطة b ، مثلاً ، تشير إلى أن

$$I_2 = I_1 + I_3 = 4.00\ A$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تتيح الحصول على الشحنة على المكثف ؟

الإجابة : عليك بتطبيق قاعدة العروة على العروة المحتوية على المكثف على الرغم من أن التيار فى الفرع المحتوى على المكثف (I_4) لابد أن يكون صفرًا . وعليك التحرك ، مثلاً ، ضد اتجاه عقارب الساعة حول العروة $defgd$.

سؤال : إذا كانت I_4 صفرًا فهل معنى ذلك أنه لا يوجد تغير فى الجهد عبر المقاوم 3 Ω ؟

الإجابة : نعم .

سؤال : كيف أستطيع تحديد اتجاه تغير الجهد عبر المكثف ؟

الإجابة : لست بحاجة لأن تعرف حتى تكتب المعادلة . وكل ما عليك هو استخدام الرمز V_{fg} للإشارة إلى تغير الجهد من f إلى g . وعندما تجد الحل فإن إشارة V_{fg} سوف تدل على اتجاه تغير الجهد .

الحل والمناقشة : تعطينا قاعدة العروة بالنسبة للعروة $defgd$ ما يلى

$$-(2.00\ A)(6.0\ \Omega) + V_{fg} + 10\ V = 0$$

ولذا فإن $V_{fg} = 2.0\ V$

ولابد أن تكون الشحنة على المكثف هى

$$q = Cv_{fg} = (5.0 \times 10^{-6}\ F)(2.0\ V) = 1.0 \times 10^{-5}\ C$$

لاحظ أن اللوح المتصل بالنقطة g هو اللوح الموجب للمكثف .

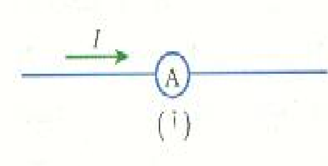
18-10 الأميترات والفولتميترات

رأينا في المثال 6-18 حالة نموذجية حيث استخدم أميتر وفولتميتر في الدائرة . وعلى الرغم من أننا سنعرف تركيب هذه الأجهزة في الفصل التاسع عشر ، إلا أننا لن نؤجل مناقشة كيفية استخدامها لأنك سوف تستخدمها في المعمل .

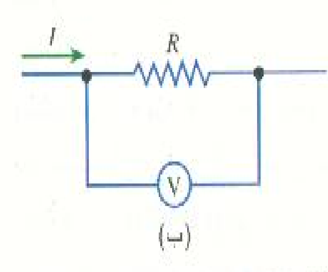


نستخدم كلاً من الأجهزة الرقمية والتناظرية لقياس التيار وفرق الجهد .

يستخدم الأميتر في قياس التيار المار في سلك ما . ويتم توصيله مباشرة في خط واحد مع السلك كما هو موضح في الشكل 23-18 (أ) . لاحظ أن التيار المراد قياسه يمر من خلال الجهاز . فإذا كان للجهاز مقاومة كبيرة فإنه سيغير من قيمة التيار . وعلى هذا فإن مقاومة الأميتر المثالي تكون صفرًا . أما ما تستخدمه في المعمل من أميترات ـ في العادة ـ فإن مقاومتها تكون كسرًا من الأوم .



(أ)



(ب)

شكل 23-18:
لماذا وجب أن يكون للأميتر مقاومة ضئيلة وللفولتميتر مقاومة لانهائية تقريبًا ؟

وتستخدم الفولتميترات في قياس فرق الجهد . ولقياس فرق الجهد $V = IR$ عبر المقاوم في الشكل 23-18 (ب) فإن طرفي الفولتميتر لابد وأن يتصلا بنهايتي المقاوم بالطريقة الموضحة بالشكل . ومن الناحية المثالية فإننا نود للفولتميتر أن يدع الدائرة غير مضطربة . وهذا الأمر ممكن لو أن مقاومة الفولتميتر كبيرة جدًا . والفولتميتر المثالي تكون مقاومته لانهائية بحيث لا يمكن للتيار المار في الدائرة أن يتفرع عند نقطة توصيل الجهاز .

ويواجه الطلاب الذين يخلطون بين الأميتر والفولتميتر في مواقف كالمبينة في الشكل 23-18 خطرًا حقيقيًا على الحياة والسعادة بسبب الاستياء الشديد الذي سيبديه مدرس المعمل لديهم . فالفولتميتر المثالي مقاومته لانهائية . أي أنه لن يمر تيار خلاله عند توصيل طرفيه إلى نقطتين تختلفان اختلافًا كبيرًا في الجهد . أما الأميتر المثالي فإن مقاومته صفرية ، ولو أن طرفيه وصلا سهوًا إلى نقطتين جهداهما مختلفان فإن التيار خلال الأميتر سوف يعطى بالعلاقة

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\text{أى مقدار}}{\text{صفر}} \rightarrow \infty$$

ويكون خطأ الطالب فى هذه الحالة مصحوبًا بالدخان المنبعث من علبة الجهاز وبضرر لا يمكن إصلاحه للجهاز وبموقف عدائى من جانب المدرس . لذا يجب الاحتراس .

18-11 الدوائر المنزلية

لاشك أننا معتادون على وجود الدوائر الكهربية الممتدة داخل منازلنا . فشركات توزيع القوى الكهربية تقوم بمد سلكين على الأقل إلى كل منزل لإمداده بفرق للجهد مقداره نحو 120 V *. ويكون لأسلاك التوصيل هذه عادة قطر كبير حتى تحمل تيارًا كبيرًا دون أن ترتفع درجة حرارتها . (كلما كانت مساحة المقطع المستعرض للسلك كبيرة كلما قلت مقاومته . وحيث أن الحرارة المتولدة تتناسب مع I^2R ، فإن المقاومة المنخفضة تضمن تبددًا أقل للحرارة) .

وفى معظم البيوت الأحدث تصنع الأسلاك بحيث تتحمل تيارات تصل إلى 20 A دون حدوث تسخين غير مطلوب على أنه للوقاية من التيارات الكبيرة يوصل مصهر (فيوز) أو قاطع للدائرة على التوالى مع السلك . وتكون مهمته فصل السلك تلقائيًا عن مصدر الجهد لو سحب تيار أكبر من المسموح به من المصدر .

وتتكون دائرة منزل تقليدية من سلكين متوازيين ممتدين خلال المنزل من المصدر ذى الجهد 120 V والذى يصل إلى المنزل عن طريق الأسلاك « الواصلة » (الشكل 18-24) . ويتصل أحد أطراف كل بصيلة إضاءة أو جهاز ما أو غيرها بالسلك ذى الجهد العالى ، أما الطرف الآخر فيتصل بالسلك ذى الجهد المنخفض . وعندما يغلق مفتاح جهاز ما فإن الشحنات يمكنها التدفق خلال الجهاز . والسلك ذو الجهد المنخفض يتصل عادة بالأرض .



شكل 18-24:
عند غلق مفتاح ما ، فإن التيار يمر خلال الجهاز المتصل بذلك المفتاح .

ولكثير من الأجهزة التى تعمل بجهد مقداره 120 V أصبع ثالثة بالقابس تقوم بالتوصيل بين سلك الأرضى والإطار المعدنى للجهاز . فإذا مس سلك الجهد المرتفع الإطار المعدنى بالصدفة لحدث اتصال مباشر بالأرض وهنا يمر تيار كبير من خلال سلك الجهد المرتفع إلى الأرض وتكون النتيجة أن ينقطع سلك المصهر (الفيوز) المتصل بسلك الجهد المرتفع . أما إذا لم يكن هناك سلك أرضى فإن هذا الخلل يؤدى إلى أن يصبح الجهاز « طافيًا » عند جهد مرتفع . حتى إذا مس أى شخص الإطار المعدنى فإنه يصاب بصدمة .

سنحسب الآن مقدار التيار الذى تسحبه بصيلة شدتها 60 W كالمبينة فى الشكل 18-24 عند إضاءتها . بما أن القدرة تساوى VI وبما أن $P = 60$ W وكان فرق الجهد

---

* يعكس فرق الجهد الذى توفره شركات القوى الكهربية اتجاهه باستمرار على هيئة دالة جيبية . وسندرس هذا النوع من الفولطية بالتفصيل فى الفصل الحادى والعشرين . أما فى ما يخص الجزء الحالى فإن الجهد المتردد له تأثير يشبه ذلك الذى للجهد المستمر (dc) .

فى هذه الحالة 120 V فإن التيار المار فى البصيلة $I = 0.500$ A . وبالمثل ، عندما تدار محمصة الخبز فإنها تسحب تيارًا مقداره 10.0 A ، ويسحب جهاز الراديو 0.167 A أما البصيلة التى شدتها 120 W فإنها تسحب 1.00 A . وإذا أديرت كل هذه الأشياء معًا فإن ما مجموعه 11.667 A من التيار سيمر خلال المصهر . وتتصل دائرة المنزل عادة بمصهر لا يقل عن 15 A ولذا لن يكون هناك خطر فى هذه الحالة .

والمنزل الذى به العديد من الأجهزة الكهربائية ، يحتاج إلى أكثر من دائرة . ولأغلب المنازل دوائر عديدة منفصلة عن بعضها البعض ، ولكل دائرة مصهرها الخاص بها يشبه الموضح فى الشكل 24–18 .

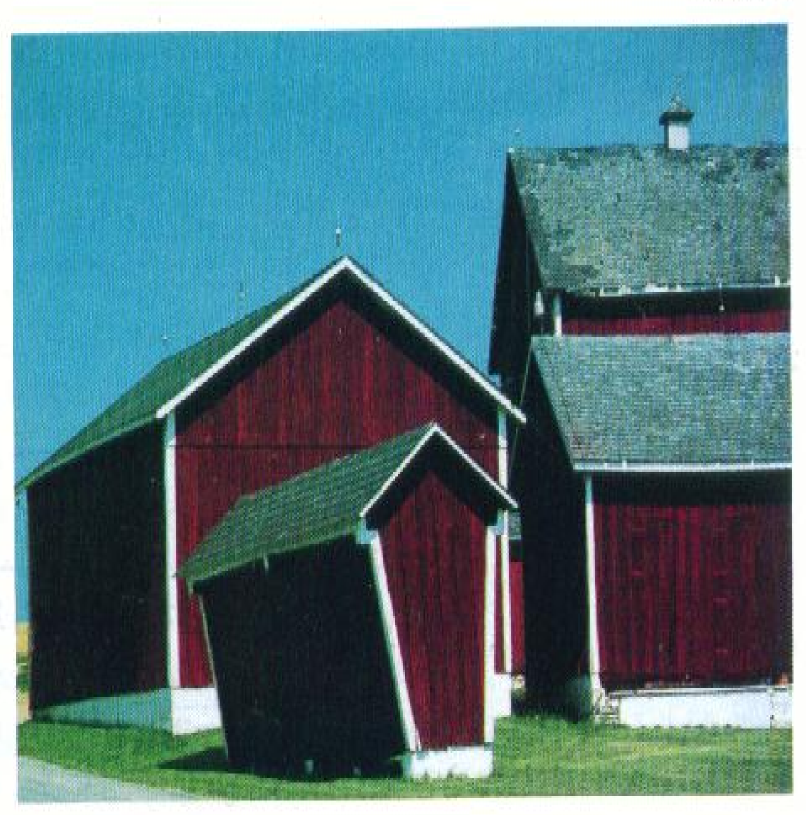
ومن الشيق حساب مقاومة بصيلة إضاءة . عندما تكون البصيلة باردة فإن مقاومتها لا تكون كبيرة جدًا . على أنها إذا وصلت بمصدر الجهد المقرر وهو عادة 120 V فإن عنصر المقاومة يصبح ساخنًا إلى درجة الإبيضاض . وكما درسنا من قبل فإن مقاومتها تزداد بشكل ملموس كلما ارتفعت درجة حرارتها ، وعندما تكون البصيلة ساخنة فإنها عندئذ تعمل عند نفس قيمة القدرة بالوات المسجلة عليها . فإذا فرضنا أن لدينا بصيلة مطبوعًا عليها 60 W ، 120 V ، فإننا نعرف أن :

$$P = VI = \frac{V^2}{R}$$

$$60\ \text{W} = \frac{(120\ \text{V})^2}{R}$$

$$R = 240\ \Omega$$

فى حين إننا قد رأينا فى المثال 1–18 أن مقاومة هذه البصيلة عند درجة حرارة الغرفة نحو 27 Ω .



تتصل قضبان البرق المثبتة على قمم هذه المبانى الريفية بالأرض بواسطة أسلاك كالتى ترى عند الحافة اليمنى للمبنى الذى على يمين الصورة . وتسمح الأطراف المدببة لهذه القضبان للشحنة المستحثة بداخلها بواسطة السحب أن تتسرب وبذلك تمنع تراكم الشحنات وتقلل من احتمالات التدمير المفاجئ لضربات البرق . وفى حالة ما إذا ضرب البرق المبنى بالفعل فإنه يتجه أولاً إلى القضيب فتتخذ الشحنة طريقًا إلى الأرض وبذلك تتم حماية المبنى من التدمير الشديد .

18-12 الأمان الكهربى

حيث أننا نستخدم الأجهزة الكهربائية كل يوم ، فإن علينا أن نفهم قواعد الأمان الكهربى . فهناك طريقتان يمكن للكهرباء أن تقتل إنسانًا من خلالهما . فالكهرباء قد تتلف عضلات القلب والرئتين (أو أى أعضاء حيوية أخرى) أو قد تحدث حروقًا قاتلة . بل إنه حتى التيار الصغير قادر على إفساد وظائف الخلية فى ذلك الجزء من الجسد الذى يمر التيار من خلاله . وعندما يكون التيار 0.001 A أو أكبر فإن الشخص يستطيع الإحساس بالصدمة . أما عند تيار شدته 0.01 A فإن الشخص لا يستطيع أن يفلت السلك الكهربائى من يده لأن التيار يجعل عضلات اليد تتقلص بشدة . وإذا وصل التيار إلى 0.02 A ومر خلال الجزع فإنه يسبب شللاً لعضلات الجهاز التنفسى فيتوقف التنفس . وما لم يسعف المصاب فورًا بإجراء تنفس صناعى فإنه يختنق . ومن الطبيعى أن تخلص الضحية من مصدر الجهد قبل أن يمسه أى إنسان ، وإلا كان المنقذ نفسه معرضًا لخطر عظيم . وعندما يمر تيار شدته نحو 0.1 A خلال منطقة القلب فإن عضلات القلب تصدم بتقلصات سريعة وغير منتظمة (أو ما يطلق عليه اختلاجات بطينية) لدرجة أن القلب لا يمكنه العمل بعد ذلك وفى النهاية فإن تيارات شدتها 1 A أو أكثر تحدث حروقًا خطيرة بأنسجة الجسم التى تمر خلالها .

ولكى نمنع الضرر **فإن الكمية المهمة التى يجب التحكم فيها هى التيار . أما الجهد فهو مهم فقط لأنه يجعل الشحنات تسرى .** وعلى الرغم من أن جسدك قد يشحن حتى يصل الجهد إلى عدة آلاف من الفولتات أعلى من جهد معدن جسم السيارة عندما تنزلق على مقعد السيارة ، إلا أنك لا تشعر إلا بوخزة غير ضارة عندما تلمس مقبض الباب . والواقع ، أن جسدك لا يمكن أن يحتفظ بشحنة كبيرة عليه ولهذا فإن التيار المار من يدك إلى مقبض الباب لا يستغرق سوى وقت قصير ، مما يجعل تأثيره على خلايا جسدك ضئيلاً .

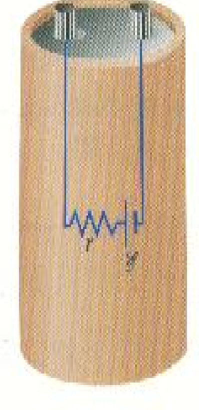
وفى بعض الظروف ، فإن دائرة منزلية جهدها 120 V تسبب غالبًا الموت المؤكد . وعادة ما يوصل أحد سلكى الدائرة بالأرض ولذا يكون دائمًا عند نفس جهد أنابيب المياه بالمنزل . افترض أنك غمرت جسدك فى حوض الاستحمام بالمنزل (البانيو) ، بحيث يكون جسدك متصلاً - عمليًا - بالأرض من خلال مياه الاستحمام والأنابيب ؛ فإذا لمست يدك مصادفة السلك ذى الجهد المرتفع فى دائرة المنزل (وذلك عند لمس سلك مكشوف داخل راديو أو سخان كهربائى ، مثلاً) فإن الشحنة تتدفق خلال جسدك إلى الأرض . ونتيجة للاتصال الجيد والكفء بين جسدك والأرض فإن مقاومة الجسد تكون منخفضة ، وبالتالى فإن التيار المتدفق خلال الجسد يكون كبيرًا لدرجة تعرضك للصعق بالكهرباء .

وقد تحدث مواقف مشابهة فى أماكن أخرى . فعلى سبيل المثال ، لو أنك لمست مصادفة سلكًا مكشوفًا ، حال وقوفك على الأرض بأقدام مبتلة ، فإنك تكون معرضًا لخطر أكبر بكثير مما لو كنت واقفًا فوق سطح جاف وعازل ؛ وذلك لأن الدائرة الكهربية المارة

من خلال جسدك إلى الأرض ذات مقاومة أكبر بكثير لو كانت أقدامك جافة. وبالمثل ، لو أنك تعرضت لصدمة كهربية عند لمسك لسلك عار أو أحد الأجهزة التي بها خلل ، ستكون الصدمة أشد وأقسى لو كانت يدك الأخرى تقبض على صنبور الماء أو مغمورة في الماء .

وكما هو واضح من هذه الأمثلة فإن خطر الصدمة الكهربية يمكن تلافيه إذا تجنبنا مرور التيار خلال أجسادنا . فإذا زاد فرق الجهد عن 50 V فإن عليك تجنب لمس أي جزء معدني مكشوف من الدائرة . ولو كان عليك أن تمس سلكًا عند جهد مرتفع ، مثلاً ، وذلك إذا وقعت مشكلة في خط القدرة الكهربية ولم تكن النجدة متاحة على الفور ، فيمكنك عندئذ إبعاد السلك باستخدام عصا جافة أو أية مادة عازلة أخرى . فإذا خامرك الشك فيما يتعلق بالسلامة فتجنب أي تلامس أو اقتراب من أي جسم معدني أو أرض مبللة . **وفوق كل ذلك لا تجعل جسدك حلقة وصل بين نقطتين عند جهدين مختلفين اختلافًا شديدًا .**

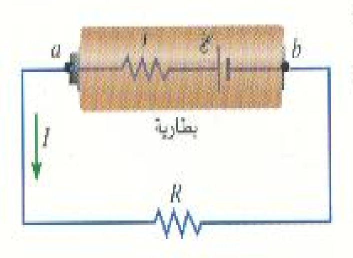
18-13 القوة الدافعة الكهربية (EMF) والجهد الطرفي للبطارية



شكل 18-25:
تعمل البطارية كما لو كانت مؤلفة من قوة دافعة كهربية (emf) نقية ($R = 0$) ومتصل معها مقاوم على التوالي .

من المحتمل أن يكون كل منا قد لاحظ في وقت ما أو آخر ، أن أضواء السيارة تخفت عند إدارة المحرك . والسبب في هذا هو أن البادئ الكهربي يسحب تيارًا كبيرًا من البطارية ، وهو بهذا يقلل من الجهد بين طرفي البطارية فتخفت أضواء السيارة وسنقوم الآن بدراسة عدم ثبات فرق الجهد الطرفي للبطارية .

لقد أشرنا في الفصل السابع عشر إلى أن (emf) للبطارية تتولد من التفاعل الكيميائي داخل البطارية . على أن البطارية أداة كيميائية معقدة جدًا ولا يمكن للشحنة أن تتحرك بداخلها دون أن تواجه مقاومة داخلية . ونتيجة لهذا تتصرف البطارية في دائرة ما على أنها مصدر نقي للقوة الدافعة الكهربية ($R = 0$) متصل على التوالي مع مقاوم . ويوضح الشكل 25-18 هذه المقاومة الداخلية r وعنصر الدائرة المكافئ للبطارية .



شكل 18-26:
فرق الجهد عبر طرفي البطارية هو $\mathscr{E} - Ir$.

لاحظ أنه عندما لا يسحب تيار من البطارية ، فإنه لن يدخل فرق للجهد عبر المقاومة الداخلية r . ومن ثم يكون فرق الجهد بين طرفيها مساويًا لقوتها الدافعة الكهربية . على أنه لو وصلت البطارية عبر مقاوم خارجي ، كما في الشكل 26-18 فإن التيار يكون I . وفرق الجهد عبر الطرفين هو

$$\text{الجهد الطرفي} = V_T = \mathscr{E} - Ir \quad (\text{أثناء التفريغ})$$

وإذا كانت البطارية تمر بعملية شحن ، أي لو كان التيار يتدفق خلال البطارية من الطرف الموجب إلى الطرف السالب فإن :

$$\text{الجهد الطرفي} = V_T = \mathscr{E} + Ir \quad (\text{أثناء الشحن})$$

وبالنسبة لبطارية جيدة قوتها 12 V ، فإن مقاومتها الداخلية لا تتجاوز نحو 0.01 Ω وعند توصيل هذه البطارية عبر مقاوم 3 Ω فإن :

$$I = \frac{12\ V}{3\ \Omega + 0.01\ \Omega} \approx 4\ A$$

والجهد الطرفى V_T هو فرق الجهد بين النقطتين a و b :

$$V_T = 12\ V - (4\ A)\ (0.01\ \Omega) = 11.96\ V$$

وفى هذه الحالة فإن الجهد الطرفى مساوٍ تقريبًا للقوة الدافعة الكهربية .

على أنه كلما تقدم العمر بالبطارية ، كلما زادت مقاومتها الداخلية ؛ ولو أن المقاومة الداخلية للبطارية زادت حتى صارت $1.0\ \Omega$ فإن التيار الذى يمر فى مقاومة $3\ \Omega$ متصلة بالبطارية يصبح :

$$I = \frac{12\ V}{4\ \Omega} = 3.0\ A$$

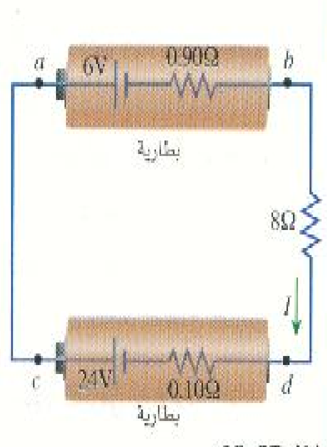
أما الجهد الطرفى فيكون

$$V_T = 12\ V - 3.0\ V = 9.0\ V$$

ولابد أن يكون واضحًا ، أنه عند تشغيل بادئ الحركة فإن السيارة تسحب نحو 100 A من البطارية ، وعندئذ ينخفض الجهد الطرفى للبطارية ـ حتى وإن كانت جديدة ـ بشكل ملحوظ .

مثال 8-18 :

ما هو الجهد الطرفى لكلٍ من البطاريتين فى الشكل 27-18 ؟



شكل 27-18: تقوم البطارية 24 V بشحن البطارية 6 V . وسنجد أن فرق الجهد الطرفى لبطارية تتفرغ أقل من قوتها الدافعة الكهربية ، بينما يكون العكس هو الصحيح بالنسبة لبطارية تُشحن .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى على أن أعرفه لتعيين الجهود الطرفية ؟

الإجابة : بما أنك تعرف المقاومتين الداخليتين فيمكنك حساب الجهد بين الطرفين لو استطعت إيجاد التيار المار خلال البطاريتين .

سؤال : ما موقف قاعدة العروة لكيرتشوف من هذه الدائرة ؟

الإجابة : إذا سرنا حول الدائرة فى اتجاه حركة عقارب الساعة ، بادئين من النقطة a :

$$-6\ V - I(0.90\ \Omega) - I(8\ \Omega) - I(0.10\ \Omega + 24\ V) = 0$$

ومن ثم ،

$$I = \frac{18\ V}{9.0\ \Omega} = 2.00\ A$$

سؤال : ما هى معادلة الجهد الطرفى ؟

الإجابة : $V_T = \mathscr{E} + Ir$. ولك أن تستخدم الإشارة الموجبة لو كانت البطارية تشحن . والإشارة السالبة عند تكون البطارية فى حالة تفريغ (أى تدفع بتيار فى الدائرة) .

الحل والمناقشة : بالنسبة للبطارية 24 V :

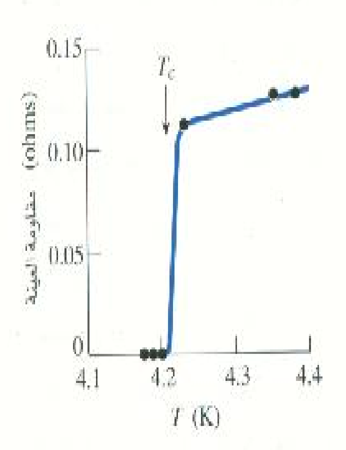
$$V_T = 24\ V - (2\ A)(0.10\ \Omega) = 23.8\ V$$

بالنسبة للبطارية 6 V التي تُشحن :

$$V_T = 6\ V + (2\ A)(0.9\ \Omega) = 7.8\ V$$

منظور حديث

الموصلية الفائقة



شكل 28-18:
انتقال الزئبق إلى حالة التوصيل الفائق كما سجله أونيس عام 1911 .

شهد مطلع القرن العشرين قدرًا كبيرًا من التكهنات حول سلوك المواد ، بما في ذلك ما يتعلق بمقاوميتها عند درجات حرارة تقترب من الصفر المطلق . ولنبدأ باسترجاع بعض ما عرفناه - بإيجاز - عن المقاومية أو المقاومة النوعية . فقد درسنا في القسم 2-18 أن المقاومية تنشأ من التصادمات بين الإلكترونات التي تكون التيار الكهربي وذرات المادة الموصلة . وعندما تتحرك الإلكترونات خلال الموصل ، فإن ما يحصلون عليه من طاقة بواسطة القوة الدافعة الكهربية في الدائرة ، تتحول إلى طاقة حرارية بفعل هذه التصادمات . ولاحظنا في القسم 4-18 أن مقاومية معظم المواد الموصلة تتناقص بانخفاض درجة الحرارة . وهنا نتساءل ، « هل تهبط المقاومية إلى الصفر لو أن الموصل يمكن تبريده حتى الصفر المطلق 0 K ؟ » .

وكانت أدنى درجة حرارة متاحة في المعمل حتى عام 1908 هي ما يوفرها الهيدروجين السائل ، الذي يكون سائلاً تحت الضغط الجوى من نحو 20 K إلى ما يقرب من 14 K حيث يأخذ الهيدروجين في التجمد . وقد أشارت الدلائل عند درجات حرارة أدنى من 25 K إلى أن مقاومية كثير من الفلزات تستمر في الانخفاض بانخفاض درجة الحرارة ، وإن كان معدل الانخفاض يكون أبطأ مما يحدث عند درجات الحرارة الأعلى . ثم حدث فتح كبير للوصول إلى درجات حرارة أدنى ، خلال عام 1908 عندما نجح الفيزيائي الهولندي كامرلنج أونس في إسالة الهليوم عند درجة حرارة 4.2 K .

جدول 4-18 :
أمثلة على الدرجات الحرجة للموصلية الفائقة

المادة	T_c (K)
العناصر	
التنجستين	0.01
التيتانيوم	0.40
الألومنيوم	1.19
الزئبق	4.15
الرصاص	7.18
النيوبيوم	9.46
السبائك	
50% نيكل - 50% بزموت	4.25
75% نيوديميوم - 25% ألومنيوم	17.5
75% نيوديميوم - 25% قصدير	18.0

وفي عام 1911 أنجز أونس اكتشافه المبهر بأنه بدلا من مواصلة الانخفاض المنتظم عند درجات حرارة الهليوم السائل ، فإن مقاومية الزئبق هبطت فجأة (بمعامل يزيد على 10^6 في مدى من انخفاض درجة الحرارة $\Delta T = 0.01$ K) إلى الصفر عند درجة حرارة تبلغ 4.15 K (الشكل 28-18) وقد وصف أونيس هذا الانتقال بأنه حالة جديدة للزئبق - وهي **حالة التوصيل الفائق** . وقد بات واضحًا في ما تلي ذلك من سنوات أن معظم الفلزات وعددًا كبيرًا من السبائك تُظهر هذا النوع من الانتقال المفاجئ إلى المقاومية الصفرية عند درجات حرارة مختلفة (تسمى درجات الحرارة **الحرجة** ، T_c) . ويتضمن الجدول 4-18 قائمة موجزة لدرجات الحرارة الحرجة .

ثم مضى أونيس في عمله فابتكر اختبارًا حساسًا للغاية يمكنه من تحديد ما إذا كانت مقاومية الموصل الفائق صفرًا فعلاً أم أنها صغيرة المقدار جدًا . وقد أنشأ تيارًا داخل حلقة من الرصاص باستخدام الحث المغناطيسي - وهو موضوع سنتناوله في الفصل العشرين . فلو أن مقاومية الرصاص لم تكن في الحقيقة صفرًا ، لتوقعنا أن

يضمحل التيار ليصل فى النهاية إلى الصفر نظرًا لأن طاقة حركة الإلكترونات ستتحول بالتدريج إلى طاقة حرارية للرصاص . على أن أونيس كان غير قادر على اكتشاف أى انخفاض فى تيار الحلقة طوال فترة امتدت عدة ساعات وقد أعيدت هذه التجربة عدة مرات بواسطة باحثين مختلفين منذ ذلك الوقت ، وقد لوحظ أن التيارات المارة فى الحلقات فائقة التوصيل ظلت موجودة على امتداد سنوات كثيرة دون انخفاض ملحوظ . ولهذا نستنتج أن الانخفاض المفاجئ فى المقاومية والذى يحدث عند T_c إنما يصل بها إلى الصفر حقيقةً .

ولم يظهر تفسير نظرى متكامل للموصلية الفائقة ، مبنى على ديناميكا الإلكترونات إلا عام 1957 على أيدى ج . باردين ، ل . كوبر ، ج . شريفر الذين كانوا معًا فى جامعة ألينوى ، وقد تقاسموا جائزة نوبل عام 1972 فى الفيزياء لقاء نظريتهم التى أصبحت تعرف باسم نظرية BCS (وهى الحروف الأولى من أسمائهم) . وكما هو الحال بالنسبة لمعظم الحلول الناجحة للمشكلات الفيزيائية فى القرن العشرين ، فإن نظرية BCS تقوم على مبادئ نظرية الكم . وحيث أن الأساس الرياضى لنظرية الكم يقع خارج نطاق هذا الكتاب فإن طابع مناقشة هذه النظرية سيتخذ فى ما يلى صبغة وصفية .

عندما يتحرك إلكترون ما خلال موصل فإنه يتفاعل مع الذرات القريبة منه مغيرًا من مواضعها بدرجة طفيفة ، ومتسببًا فى اهتزازات موضعية فى شبيكة الموصِّل (وهى الهيكل الفراغى الذى تترتب فيه الذرات بانتظام) . والقوة التى تؤثر على الإلكترون من جانب الذرة أثناء هذا التفاعل تشتت اتجاه حركة الإلكترون ، لاغية بذلك إسهام الإلكترون ـ مؤقتًا ـ فى التيار المار داخل الموصِّل . وعندما يكون الفلز فى درجات الحرارة « المعتادة » فإن الاهتزازات الموضعية تقتسم بسرعة وتتشتت خلال الفلز ، مما ينشأ عنه ارتفاع فى الطاقة الحرارية للفلز وهو ما أشرنا إليه من قبل على إنه **تسخين جول** .

وطبقًا لنظرية BCS ، فعندما تكون درجة حرارة الفلز أدنى من T_c فإن طاقة اهتزازات الشبيكة التى سببها إلكترون واحد ترتد سريعًا (فى غضون 10^{-12} s عادة) إلى إلكترون آخر بدلاً من اقتسامها وتشتتها خلال الموصل . ويعنى هذا أن تظل الطاقة الكلية للإلكترونات الحاملة للتيار ثابتة ، ولا يحدث احتجاز للطاقة من جانب ذرات الموصل ، ولا يكون هناك بالتالى تسخين جول . كما يعنى أن التيار الذى تحمله الإلكترونات بشكل جماعى لن يضمحل ومن ثم تكون مقاومية الموصل صفرًا .

على أن عملية تبادل الطاقة فى منظومة الإلكترون ـ الشبيكة ـ الإلكترون لا يمكن شرحها فى إطار النظرية الكلاسيكية . وتكون نتيجة تبادل الطاقة هى خلق **تفاعل تجاذبى** بين الإلكترونين المشتركين فى العملية . وتبلغ المسافة بين الإلكترونين المتفاعلين ـ ويشار إليهما **كزوج مترابط** ـ نحو $1\ \mu m$ (وهى مسافة كبيرة جدًا إذا قورنت بمتوسط التباعد بين الإلكترونات فى الفلز) كما تكون كميتا تحرك الإلكترونين الخطيتين متضادتين وكذلك تكون كميتا تحرك الإلكترونين الدورانيتين الزاويتين (المغزليتين)

متضادتين . وحيث أن التفاعل بين أى إلكترونين حرين يكون تنافريًا من خلال قوة كولوم فإن الزوج المترابط تكون طاقته أقل من طاقة إلكترونين غير مترابطين . ومع اقتراب درجة حرارة الموصل من الصفر المطلق ، فإن الاهتزازات الحرارية للشبيكة تصبح من الضعف بحيث لا تقوى على كسر الارتباط بين الإلكترونات وتصبح كل إلكترونات التوصيل خلال الموصل بأكمله عبارة عن أزواج مترابطة وفى هذه الحالة ، لن يكون هناك تبادل للطاقة بين ذرات الشبيكة والإلكترونات ولهذا تصبح مقاومة الموصل صفرًا في الحقيقة .

هناك عدد كبير جدًا من التطبيقات العلمية لظاهرة التوصيل الفائق ، وسيكون فهمها أفضل بعد دراسة المغناطيسية . ولذلك سوف نرجئ مناقشة التطبيقات إلى القسم 12-20 حيث نناقش منظورًا حديثًا آخر يتناول الخواص المغناطيسية للموصلات الفائقة . وعلينا في نفس الوقت أن نلاحظ أن درجات الحرارة الحرجة بالغة الانخفاض والمرتبطة بالتوصيل الفائق ، تتطلب الهليوم السائل كمبرد ، كما أن الوصول إليها والمحافظة عليها باهظ التكاليف . ومنذ أن اكتشف أونيس لأول مرة ظاهرة التوصيل الفائق ، فإن البحث قائم باستمرار سعيًا وراء مواد ذات درجات حرجة أكبر وأكبر حتى تصبح التطبيقات المهمة متاحة بشكل أكبر . وقد كان من الأهداف الواضحة إيجاد مواد ذات T_c فوق درجة غليان النيتروجين ، لأن النيتروجين السائل ، الذى يمكن الحصول عليه من الجو بتكلفة معقولة ، يمكن استخدامه عندئذ كمبرِّد . والنيتروجين السائل يغلى عند 77 K تقريبًا عند ضغط مقداره ضغط جوى واحد ، وهى درجة حرارة أكبر بكثير من أى درجة حرجة T_c عرفت قبل منتصف الثمانينيات من القرن العشرين .

وبدءًا من الاكتشاف الذى تم عام 1986 على أيدى ك. أ. موللر . ج. ج. بدنورز ، فإن أنواعًا جديدة من الأكاسيد الخزفية ذات الدرجات الحرجة فوق 77 K ، قد صارت هدفًا للبحوث المستفيضة . وتمتلك بعض هذه المواد موصلية فائقة عند درجات حرارة تصل إلى 120 K أو أكبر منها بقليل . ويشعر كثير من الباحثين أن قيمًا أعلى من هذه للدرجات الحرجة يمكن الوصول إليها وأن الكثير من تطبيقات التوصيل الفائق سيصبح عمليًا في المستقبل القريب . على أن آخرين يشعرون أن هناك كثيرًا من العوائق لا زال قائمًا ، مشيرين بذلك إلى أن الأكاسيد الخزفية هشة ولا يمكن سحبها لصناعة الأسلاك أو تشكيلها بسهولة لصنع أدوات مفيدة . وعلى أية حال فالبحث عن موصلات فائقة ذوات درجات مرتفعة سيبقى غالبًا دؤوبًا وبشدة خلال القرن القادم .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) دائرة التيار المستمر ، (ب) التيار ، (جـ) الأمبير ، (د) قانون أوم ، (هـ) المقاومة ، (و) الأوم ، (ز) معامل تغير المقاومية مع درجة الحرارة ، (ح) القدرة الكهربية ، (ط) قاعدتا كيرتشوف ، (ى) الدوائر المتصلة على التوالى وعلى التوازى ، (ك) المقاومة المكافئة ، (ل) فرق الجهد الطرفى والقوة الدافعة الكهربية ، (هـ) المقاومة الداخلية .

2 أن تستخدم العلاقة $I = \Delta q/\Delta t$ فى حالات بسيطة .

3 أن تفسر الرسم البيانى لدائرة بسيطة . وأن تذكر فرق الجهد بين النقط المختلفة فى الدائرة .

4 أن تذكر أىُّ طرفى مقاوم ما عند جهد أعلى عندما يكون اتجاه التيار خلال المقاوم معروفاً .

5 أن تستخدم قانون أوم فى حالات خاصة .

6 أن تحسب مقاومة قطعة معينة من السلك إذا كانت مقاومية مادة السلك معلومة .

7 أن تحسب مقاومة سلك عند درجة حرارة معينة عندما تكون المقاومة ومعامل تغيرها مع درجة الحرارة عند درجة حرارة مرجعية معروفة .

8 أن تستخدم معادلة القدرة $P = IV$ لتعيين القدرة المفقودة أو المكتسبة فى مقاوم أو بطارية أو مكثف تحت ظروف التيار المستمر .

9 أن تطبق قاعدة النقطة لكيرتشوف .

10 أن تكتب معادلة العروة لكيرتشوف بالنسبة لدائرة متصلة على التوالى وتحتوى على بطاريات ، ومقاومات ، ومكثفات .

11 أن تختزل مجموعة معينة من المقاومات المتصلة على التوالى وعلى التوازى فى مقاوم واحد مكافئ .

12 أن تستخدم قاعدتى كيرتشوف لحل دوائر التيار المستمر التى تحتوى على بطاريات ، ومقاومات وسعات .

13 أن ترسم مخطط دائرة منزلية نموذجية وأن تحدد العناصر المختلفة فيها وأن تحسب التيار المسحوب بواسطة الأقسام المختلفة للدائرة المنزلية عندما تكون الأجهزة التى يغذيها معروفة .

14 أن تحلل موقفاً كهربيًا معينًا من وجهة نظر الأمان .

15 أن تشرح سبب أن الجهد الطرفى لبطارية ما ليس دائمًا مساويًا لقوتها الدافعة الكهربية . وأن تحسب الجهد الطرفى إذا كانت كل من $\mathscr{E}$ و I و r معروفة .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدة التيار الكهربى (A)

$$1 \text{ ampere (A)} = 1 \text{ C/s}$$

وحدة المقاومة (Ω)

$$1 \text{ ohm } (\Omega) = 1 \text{ V/A}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

التيار الكهربى (I)

يعرف التيار الكهربى (بوحدات الأمبير) بأنه معدل تدفق الشحنة الكهربية .

$$I = \Delta q / \Delta t$$

ويكون اتجاه التيار هو اتجاه سريان الشحنة الموجبة .

المقاومة (R) وقانون أوم

تعرف المقاومة (بوحدات الأوم) لعنصر من عناصر الدائرة على أنها النسبة بين فرق الجهد عبر العنصر والتيار المستمر المار فيه :

$$R = \frac{V}{I}$$

وتخضع المقاومات التى لها قيمة ثابتة R على مدى من قيم V و I لقانون أوم ويقال أنها مقاومات أومية .

خلاصة :

1 عند استخدام قاعدتي كيرتشوف لتحليل دائرة ما فعليك أولاً أن تميز كل تيار فى كل فرع مستقل من أفرع الدائـرة . ويمكـن اختيار أى اتجاه لكل تيار .

2 يمكنك تطبيق قاعدة النقطة على كل نقطة يمر فيها ولو تيار واحد جديد على الأقل . لابد أن يتفق تطبيق قاعدة النقطـة مـع اختيارك لاتجاه التيار .

3 يمكنك تطبيق العروة على كل عروة مختلفة تتضمن على الأقل عنصر واحدا جديدة من عناصر الدائرة .

4 بالنسبة لإشارات تغيرات الجهد فتؤخذ كما يلى :

أ ـ البطاريات أو القوة الدافعة الكهربية : $\Delta V = +\mathscr{E}$ عندما يكون التحرك من الطرف السالب إلى الطرف الموجب .

ب ـ المقاومات : $\Delta V = -IR$ عندما تتحرك عبر المقاوم فى الاتجاه الذى اخترته للتيار .

جـ ـ المكثفات $\Delta V = +q/C$ عندما تتحرك من اللوح سالب الشحنة إلى اللوح موجب الشحنة .

5 إذا اخترت اتجاهًا خاطئًا لأحد التيارات فإن الحل بالنسبة لذلك التيار سيتخذ إشارة سالبة .

6 يكون التيار المستمر فى فرع يحتوى على مكثف صفرًا بالضرورة .

المقاومات المتصلة معًا على التوالى وعلى التوازى

المقاومات المتصلة على التوالى

المقاومة الكلية المكافئة لعدد n من المقاومات المتصلة على التوالى هى :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots + R_n \qquad \text{(على التوالى)}$$

المقاومات المتصلة على التوازى

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots\ldots + \frac{1}{R_n} \qquad \text{(على التوازى)}$$

خلاصة :

1 هذه القواعد هى نفسها المتبعة مع المكثفات فيما عدا أن قاعدتى التوالى والتوازى معكوستان .

2 تحمل كل المقاومات المتصلة على التوالى فى نفس الفرع نفس التيار بينما يكون لكـل منـها فـرق جـهد مختلـف (إذا كـانت المقاومات مختلفة) .

3 يكون لكل المقاومات المتصلة على التوازى فى فرع من فروع الدائرة نفس فرق الجهد بينما تحمل تيارات منفردة مختلفة (إذا كانت مختلفة القيم) .

القوة الدافعة الكهربية (EMF) والجهد الطرفى لبطارية ما

تعمل البطارية المتصلة فى دائرة عمل مصدر للقوة الدافعة الكهربية المتصلة علـى التـوالى مـع مقاومـة داخليـة r . وعندمـا تصدر البطارية تيارًا I فإن فرق الجهد الداخلى Ir يطرح من $\mathscr{E}$ لنحصل على الجهد الطرفى الفعال V_T :

$$V_T = \mathscr{E} - Ir$$

أما إذا كانت البطارية تتلقى تيارًا I (عند شحنها) ، فإن الجهد الطرفى يصبح :

$$V_T = \mathscr{E} + Ir$$

خلاصة :

1 يضمحل الجهد الذى تستطيع البطارية تقديمه للدائرة كلما زاد التيار المقدم منها للدائرة .

2 يكون للبطارية الحديثة مقاومة داخلية ضئيلة للغاية ، وفى هذه الحالة تكون البطارية فى وضع يسمح لـها بتقديم تيارات كبيرة عند قوة دافعة كهربية أقرب ما تكون للقيمة المقررة لـها . وكلما زاد عمر البطارية زادت مقاومتها الداخلية .

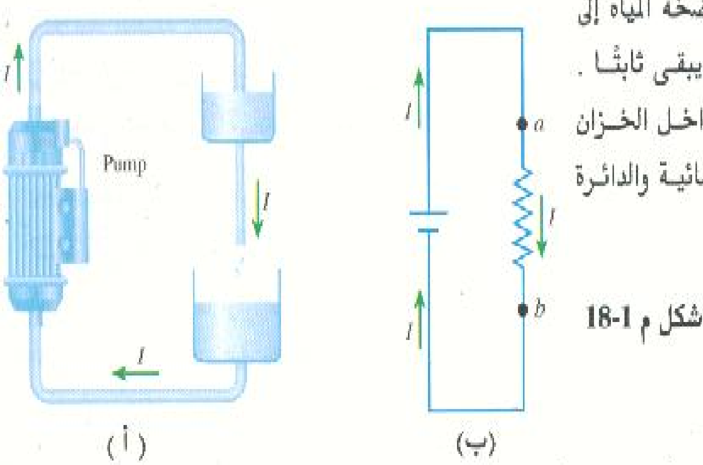
أسئلة وتخمينات

1 يصر بعض الطلاب أحيانًا على أن التيار يستهلك في القاوم . كيف يمكنك باستعمال الشبه مع المياه أن تقنع هؤلاء الطلاب بأن التيار لا يفقد فى المقاوم ؟

2 كيف لنا أن نعرف طرف البطارية ذا الجهد الأعلى ، أى الطرف الموجب في رسم تخطيطى لدائرة ما ؟ وكيف نحدد أن طرف مقاوم ما هو الذى عنده الجهد الأعلى ؟

3 بصيلات الإثارة الفلورسنت هى فى العادة أكثر كفاءة فى إشعاع الضوء عن البصيلات المتوهجة (ذات الفتيل) ، بمعنى إنه عند استعمال نفس القدر من الطاقة الداخلة ، فإن البصيلة الفلورسنت تعطى ضوءًا أكبر من الذى تعطيه بصيلة متوهجة . حاول أن تلمس بحذر بصيلة فلورسنت وأخرى متوهجة بعد أن تكونا مضاءتين لعدة دقائق . اشرح الآن لماذا كانت البصيلة المتوهجة أقل كفاءة فى إشعاع الضوء .

4 يوضح الشكل م 1-18 (أ) كيف ترفع المضخة المياه إلى خزان علوى بمعدل يجعل مستوى المياه يبقى ثابتًا . ويتساقط الماء ببطء من أنبوبة ضيقة إلى داخل الخزان السفلى . حدد أوجه الشبه بين الدائرة المائية والدائرة الكهربية المبينة فى الجزء (ب) .



شكل م 1-18

5 وصل مقاوم بين النقطتين a و b . كيف يمكن لأى شخص أن يخبر عما إذا كان هناك هبوط فى الجهد أو ارتفاع فى الجهد من النقطة a إلى النقطة b ؟ أعد السؤال بالنسبة لبطارية بالنسبة لمكثف .

6 اشرح النص التالى : بالنسبة للمقاومات المتصلة على التوالى تكون المقاومة المكافئة أكبر دائمًا من أكبر مقاومة فى المجموعة ، وبالنسبة للمقاومات المتصلة على التوازى تكون المقاومة المكافئة أصغر من أصغر مقاومة فى المجموعة .

7 استخدم أوميتر (وهو جهاز يتكون ـ أساسًا ـ من بطارية على التوالى مع أميتر حساس جدًا) لقياس مقاومتك الذاتية من إحدى يديك إلى اليد الأخرى . إن تيارًا مقداره نحو 0.02 A يمر خلال القطاع الأوسط للجسد كافٍ لإحداث شلل للجهاز التنفسى . ما هو مقدار فرق الجهد المطبق بين يديك ويكون كافيًا لصعقك ؟

8 لو إنك قبضت على سلكى التوصيل المتصلين بلوحى مكثف مشحون فقد تشعر بصدمة كهربائية . ويكون التأثير أكبر بكثير لمكثف سعته $2\,\mu F$ عنه لمكثف سعته $0.02\,\mu F$ على الرغم من أن كليهما شحن إلى نفس قيمة فرق الجهد . لماذا ؟

9 تحط الطيور على أسلاك الجهد العالى فى جميع الأوقات ؛ فلماذا لا تصعق ، حتى وإن حطت على جزء من السلك لا يغطيه العازل ؟

10 لو أن تيارًا مقداره كسر صغير من الأمبير مر من يد شخص ما وخرج من الأخرى فقد يصعق ذلك الشخص . ولكن إذا كان مسار التيار من إحدى اليدين إلى كوع نفس اليد فإن الإنسان ينجو من الصعق حتى لو كان التيار من الكبر بحيث يحرق اللحم . اشرح .

11 يفزع الوالدان دائمًا عندما يلعب أطفالهم بالقرب من مخارج الكهرباء (المقابس) . ناقش العوامل المختلفة التي تحدد مدى سوء الصدمة التي قد يصاب الطفل بها . ماذا يحدث لو أن طفلًا قام بقطع أسلاك مصباح كهربائي مستعملاً زردية قطع (قصافة) غير معزولة عندما تكون الأسلاك متصلة بمصدر الكهرباء ؟ وهل يكون هناك أي خطر على حياة الطفل ؟

12 اشرح السبب في أن لمس سلك مكشوف في دائرة منزلية عندما تكون في الطابق الأرضي الرطب ، أخطر بكثير مما لو كان اللمس لنفس السلك قد تم عندما كنت في الطابق الثاني .

13 إن استعمال جهاز راديو يعمل بالكهرباء بالقرب من حوض الاستحمام عند تكون في حوض الاستحمام بالغ الخطورة . لماذا ؟ هل ينطبق نفس الاستدلال العقلي على جهاز راديو يعمل بالبطارية ؟

مسائل

القسمان 1–18 و 2–18

1 يمر تيار مقداره 0.5 A خلال بصيلة إضاءة . (أ) ما هو مقدار الشحنة التي تمر خلال البصيلة في أربع ساعات ؟ (ب) ما عدد الإلكترونات التي تتدفق خلال المصباح أثناء هذه الفترة الزمنية ؟

2 يبلغ تيار الحزمة الإلكترونية في أنبوبة تليفزيون $56\,\mu A$. ما عدد الإلكترونات التي تضرب الشاشة كل دقيقة ؟

3 ما طول الفترة الزمنية التي تستغرقها شحنة مقدارها 64 C في المرور من خلال مساحة مقطع مستعرض لسلك ما يحمل تيارًا يساوي 72 A ؟

4 يبعث جهاز شحن للبطاريات تيارًا مقداره 3.6 A خلال بطارية لمدة 8.0 h . ما مقدار الشحنة المنتقلة إلى البطارية من جهاز الشحن في هذه الفترة ؟

5 توفر بطارية سيارة ما تيارًا مقداره 2.2 A لمدة 12 h . ما مقدار الشحنة المارة من البطارية خلال هذه الفترة ؟

■ 6 تدور شحنة منفردة مقدارها $+1.8\,\mu C$ في مسار دائري نصف قطره 2.0 m بسرعة مقدارها 1.0×10^5 m/s . ما هو متوسط التيار في المدار ؟

7 يصطدم 3.2×10^{12} إلكترونا بشاشة أنبوبة أشعة مهبط كل ثانية . ما هو التيار المقابل لحزمة الإلكترونات في الأنبوبة ؟

القسمان 3–18 و 4–18

8 عند توصيل بطارية مصباح جيب قوتها 3.0 V ببصيلة فإن التيار المار يكون 40 mA . ما هي مقاومة البصيلة ؟

9 تبلغ مقاومة فتيل بصيلة إضاءة $300\,\Omega$. ما هو التيار الذي يمر بها عند توصيلها إلى مصدر للجهد مقداره 120 V ؟

10 افترض أن مقاومة جسمك من طرف لآخر هي $30\,k\Omega$. ما هو التيار الذي يمر خلال جسدك إذا قبضت على طرفي بطارية قوتها 9.0 V ؟

11 يسحب جهاز التليفزيون الملون تيارًا مقداره 2.4 A عند تشغيله بجهد مقداره 120 V . ما هي المقاومة الفعالة للجهاز ؟

12 ما هو فرق الجهد عبر مقاوم $240\,\Omega$ إذا كان التيار المار به 0.25 A ؟

■ 13 يحمل مقاوم ما تيارًا مقداره 0.40 A عند توصيله بمصدر جهده 120 V . كم ستبلغ شدة التيار عندما (أ) خفض الجهد إلى 96 V ، (ب) أزيد الجهد إلى 144 V ؟

■ 14 مصباح للجيب يعمل بثلاث بطاريات قوة كل منها 1.5 V متصلة معًا على التوالي . ما هي مقاومة بصيلة الإضاءة إذا كانت تسحب تيارًا مقداره 0.60 A ؟

15 شحنة مقدارها 6.0×10^4 تسري لمدة ساعة خلال مقاوم عندما يكون فرق الجهد عبره 9 V . أوجد مقاومة المقاوم .

16 أوجد مقاومة سلك من الألومنيوم طوله 24 m وقطره 1.6 mm عند درجة حرارة 20°C .

17 أوجد مقاومة سلك من الفضة طوله 40 cm وقطره 0.160 m عند درجة حرارة 20°C .

■ 18 قيست مقاومة بكرة من السلك النحاسي المعزول وذلك بتوصيل السلك كله ببطارية قوتها 9 V وتسبب مرور تيار شدتـه 0.3 A في السلك بأكمله . فإذا كان قطر الجزء المعدني من السلك هو 0.80 mm . فكم يكون طول السلك بالبكرة ؟

■ 19 يبلغ قطر السلك النحاسي الذي رقمه 18 ما قيمته 1.024 mm . وحد الأمان الأقصى لشدة التيار المار في مثل هذا القطـر من السلك هو 12 A . (إذا زاد التيار عن هذا فإن السلك يصبح ساخنًا جدًا) . (أ) أوجد مقاومة قطعة طولـها 20 m مـن هذا السلك عند درجة حرارة 20°C . (ب) كم يبلغ فرق الجهد بين طرفي قطعة السلك المذكورة في (أ) إذا كانت تحمل تيارًا قدره 12 A ؟

20 يُراد استخدام سلك مقاومته 0.25 Ω لكل متر من طوله في مد شبكة أسلاك كهربائية بمنزل . ما هو أقصى طول من السلك يمكن استخدامه إذا كانت المقاومة الكلية للسلك لا يجب أن تزيد على 750 Ω ؟

21 أريد استخدام ملف من سلك التنجستين مقاومته 30 Ω عند 20°C في قياس درجة الحرارة . ما مقدار التغير فـي مقاومتـه عندما تتغير درجة الحرارة بمقدار 4°C بالقرب من 20°C ؟

22 يصنع عنصر التسخين في مدفأة غرفة من سلك النيكل ـ كروم الذي يبلغ قطره 1.0 mm . اعتبر أن مقاومية النيكل ـ كروم تساوي 10^{-6} Ω.m . فإذا كانت مقاومة المدفأة 25 Ω فكم يكون طول السلك في عنصر التسخين ؟

23 تبلغ مقاومة ملف من السلك 156.8 Ω عند 20°C ، و 166.6 Ω عند 50°C . ما هو عامل تغير المقاومة مع درجة الحـرارة لمادة هذا السلك ؟

24 ما هي النسبة المئوية لتغير مقاومة سلك من التنجستين عندما تتغير درجة حرارته من 15 إلى 36°C ؟

25 عند أية درجة حرارة تكون مقاومية الألومنيوم هي نفس مقاومية التنجستين عند 20°C ؟

■ 26 يحمل سلك من الحديد طوله 3 m تيارًا مقداره 0.2 A عندما يوصل ببطارية قوتها 6 V . مـا هـو طـول سـلك مـن الفضـة يحمل نفس التيار عندما يتصل ببطارية قوتها 6 V أيضًا ؟

القسم 5–18

27 بصيلة إضاءة مطبوع عليها 100W/120V . (أ) ما مقدار التيار الذي تسحبه ؟ (ب) ما هي مقاومتها عندما تعمـل بجـهد مقداره 120 V ؟

28 صمم مصباح فلورسنت قدرته 15 W ليعمل بفرق جهد مقداره 120 V . (أ) ما مقدار التيار الذي يسحبه ؟ (ب) ما هي مقاومته ؟

■ 29 يصنع عنصر التسخين في مدفأة غرفة من سلك التنجستين طوله 4 m . وعندما توصل المدفأة بجهد مقداره 120 V فإن درجة حرارة الفتيل تصل إلى 450°C وتستهلك 1500 W من القدرة . ما هي مساحة المقطع المستعرض للسلك ؟

30 كم من الوقت يستغرق سخان مغمور قدرته 500 W لكي يرفع درجة حرارة 300 g من الماء مـن 23°C إلى 88°C ؟ اعتبر عـدم وجود أي فقد للحرارة إلى الأجسام المجاورة .

31 يعمل جهاز تشغيل الأسطوانات المدمجة ببطارية قوتها 9 V وعندئذ يسحب تيارًا مقداره 280 mA . ما مقدار الطاقة التـي يبددها ؟

32 محرك قدرته 0.5 hp (حصان) متصل بخط للجهد شدته 120 V . ما مقدار التيار الذي يسحبه المحرك ؟

33 (أ) ما مقدار الطاقة (معظمها حراري) التي تشعها بصيلة مضاءة قدرتها 75 W في فترة 5 min. ؟ (ب) كـم كيلـو وات ساعة تستهلك في هذه الفترة ؟

34 حدث ارتفاع مفاجئ فى جهد خط كهربى فأصبح الجهد لحظيًا 132 V . ما هى النسبة المئوية لزيادة الناتج من بصيلة مصباح إضاءة أرقامه 60 W/120V بفرض أن مقاومتها لا تتغير ؟

35 يعمل أحد مصابيح الإنارة في الشارع قدرته 200 W لمدة 12 h يوميًا . ما عدد الكيلو وات ـ ساعة من الطاقة يتم استهلاكها في 30 يومًا ؟ ما مقدار التكلفة إذا كان سعر الكيلو وات من الكهرباء هو 0.068 $ ؟

الأقسام من 18-6 إلى 18-10

36 أوجد المقاومة المكافئة للمقاومات 2 Ω ، 4 Ω ، 6 Ω ، 10 Ω عندما تتصل (أ) على التوالى و (ب) على التوازى .

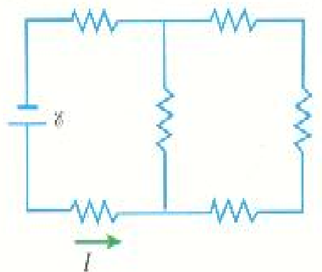
37 وصِّلت ثلاث مقاومات هى 2 Ω ، 3 Ω ، 6 Ω على التوازى ، ثم وصِّلت المجموعة على التوالى مع مقاوم 4 Ω . ما هى المقاومة المكافئة للمجموعة ؟

38 وصِّلت ثلاثة مقاومات 6 Ω و 2 Ω ، 10 Ω على التوالى مع بطارية 9 V . (أ) أوجد المقاومة المكافئة للمجموعة . (ب) ما مقدار التيار المار في كل مقاوم ؟

39 وصلت المقاومات فى المسألة السابقة على التوازى عبر بطارية 9 V . أوجد (أ) المقاومة المكافئة للمجموعة . (ب) التيار المار فى كل مقاوم .

■ 40 وصل المقاومان 4 Ω و 6 Ω على التوازى عبر بطارية . وكان التيار المار خلال المقاومة المكافئة 2.5 A . أوجد فولطية البطارية .

41 كل مقاوم فى الشكل م 2-18 مقداره 6 Ω وكانت $\mathscr{E} = 3.0$ V . أوجد (أ) المقاومة المكافئة للمجموعة و (ب) التيار المسحوب من البطارية .



شكل م 2-18

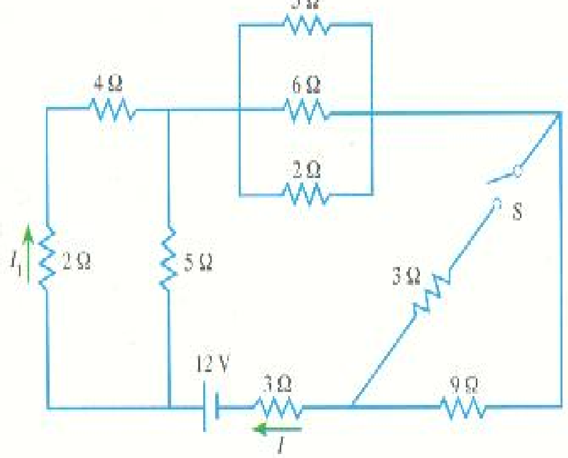
■ 42 فى الشكل م 2-18 كانت كل من المقاومات الرأسية 4 Ω ، بينما كانت كل من المقاومات الأفقية 6 Ω . أوجد (أ) المقاومة المكافئة للمجموعة و (ب) التيار المسحوب من البطارية إذا كانت $\mathscr{E} = 3.0$ V .

■ 43 فى المسألة رقم 42 أوجد التيار المار خلال المقاومين الرأسيين .

■ 44 وصل مقاومان أحدهما 8 Ω والآخر 10 Ω على التوالى مع مصدر للجهد . وكان فرق الجهد عبر المقاوم 10 Ω هو 25 V . ما مقدار الجهد الصادر من مصدر الجهد ؟

■ 45 وصل المقاومان المذكوران فى المسألة 44 على التوازى عبر مصدر للجهد . وكان التيار المار خلال المقاوم 8 Ω هو 1.2 A . أوجد الجهد الصادر من مصدر الجهد ؟

■ 46 أوجد المقاومة المكافئة كما ترى من جهة البطارية فى شكل م 3-18 . (أ) عندما يكون المفتاح S مفتوحًا و (ب) عندما يكون مغلقًا . (جـ) ما هو التيار المار خلال المقاوم 4 Ω عندما يكون المفتاح مغلقا ؟

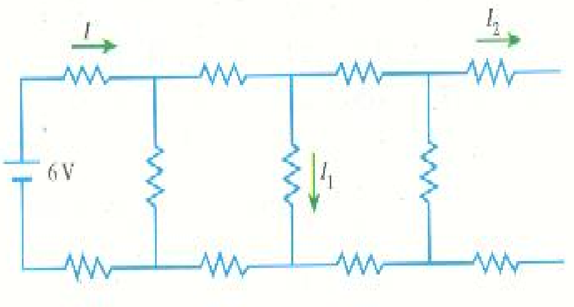


شكل م 3-18

■ 47 فى المسألة رقم 46 أوجد التيار المار خلال المقاوم 9 Ω (أ) عندما يكون المفتاح S مفتوحًا و (ب) عندما يكون مغلقًا .

■ 48 فى الشكل م 3–18 أوجد فرق الجهد عبر المقاوم 3 Ω المجاور للبطارية من ناحية اليمين (أ) عندما يكون المفتاح S مفتوحًا و (ب) عندما يكون مغلقًا .

■ 49 (أ) أوجد المقاومة المكافئة للدائرة المبينة فى الشكل م 4–18 لو كانت قيمة كل مقاوم 5 Ω فى الدائرة الموضحة بأكملها . (ب) أوجد I . (جـ) أوجد I_1 . (د) ما مقدار I_2 ؟

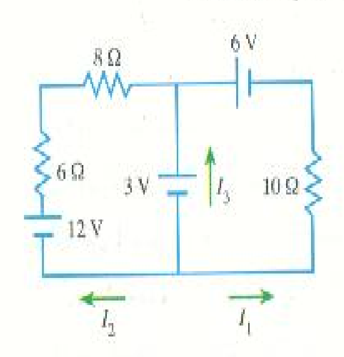


شكل م 4–18

■ 50 أعد المسألة السابقة عندما يكون كل من المقاومات الأفقية يساوى 4 Ω وكل من المقاومات الرأسية 6 Ω .

■ 51 أوجد التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 فى الشكل م 5–18 .

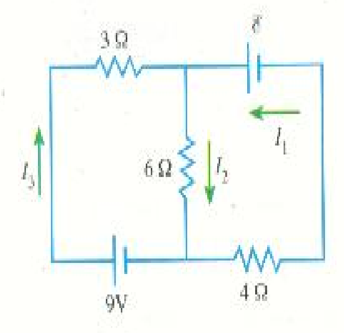
■ 52 افترض أن قطبية البطارية فى الشكل م 5–18 قد عكست ، فكم تكون قيم التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 ؟



شكل م 5–18

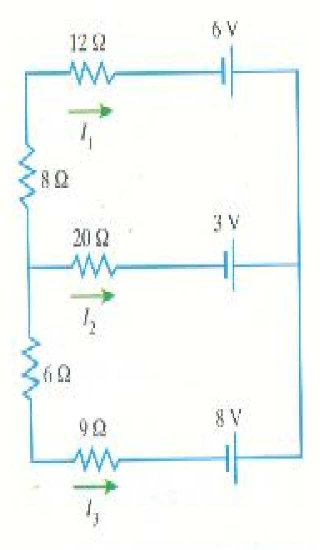
■ 53 فى الشكل م 5–18 وجد أن التيار I_3 هو 3 A عند قياسه . أوجد (أ) التيارين I_1 ، I_2 ، (ب) القوة الدافعة الكهربية $\mathscr{E}$ للبطارية و (جـ) فرق الجهد عبر المقاوم 4 Ω .

■ 54 فى الشكل م 6–18 ، إذا كانت $\mathscr{E}$ تساوى 8 V أوجد (أ) التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 و (ب) فرق الجهد عبر المقاوم 3 Ω .

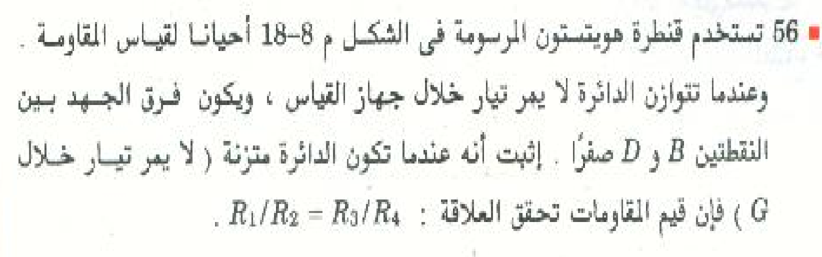


شكل م 6–18

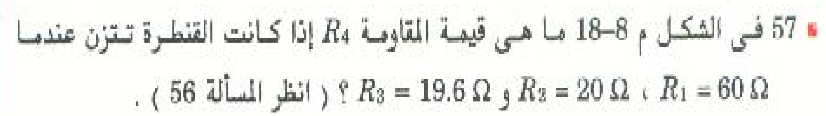
■■ 55 فى الشكل م 7–18 أوجد (أ) التيارات المارة فى كل جزء من الدائرة و (ب) فرق الجهد عبر كل مقاوم .



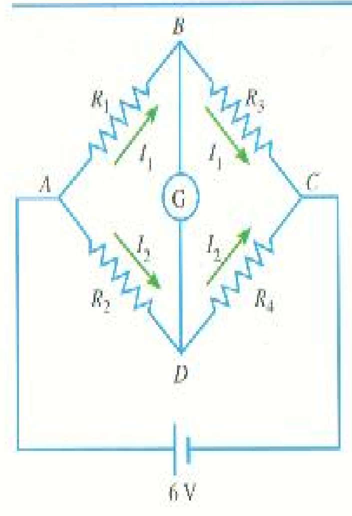
شكل م 7–18



▪ 56 تستخدم قنطرة هويتستون المرسومة فى الشكل م 8–18 أحيانا لقياس المقاومة . وعندما تتوازن الدائرة لا يمر تيار خلال جهاز القياس ، ويكون فرق الجهد بين النقطتين B و D صفرًا . إثبت أنه عندما تكون الدائرة متزنة (لا يمر تيار خلال G) فإن قيم المقاومات تحقق العلاقة : $R_1/R_2 = R_3/R_4$.



▪ 57 فى الشكل م 8–18 ما هى قيمة المقاومة R_4 إذا كانت القنطرة تتزن عندما $R_1 = 60\ \Omega$ ، $R_2 = 20\ \Omega$ و $R_3 = 19.6\ \Omega$ ؟ (انظر المسألة 56) .

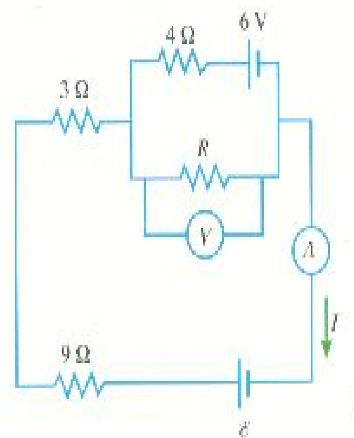


شكل م 8–18

▪ 58 يقرأ الفولتيميتر فى الشكل م 9–18 ، 3.6 V أما الأميتر فيقرأ 2.2 A عندما يكون اتجاه التيار كما هو موضح بالشكل . أوجد (أ) R و (ب) $\mathscr{E}$.

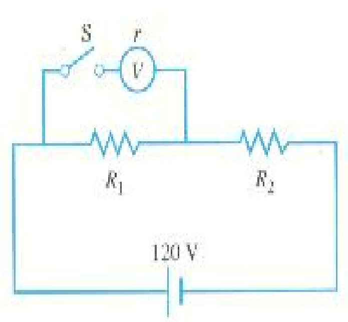
▪ 59 فى الشكل م 9–18 ، ما مقدار $\mathscr{E}$ لو كان التيار المار خلال البطارية 6 V صفرًا عندما كانت $R = 14\ \Omega$ ؟

▪ 60 فى الشكل م 9–18 ، إذا كانت $\mathscr{E} = 28\ V$ و $R = 8\ \Omega$ فما هى قراءة (أ) الأميتر ، (ب) الفولتميتر ؟



شكل م 9–18

▪ 61 يستخدم فولتيميتر مقاومته الداخلية $4.0 \times 10^4\ \Omega$ لقياس فرق الجهد عبر المقاوم $R_1 = 12\ k\Omega$ كما فى الشكل م 10–18 . اعتبر $R_2 = 24\ k\Omega$. (أ) ما مقدار فرق الجهد عبر R_1 عندما يكون المفتاح S مفتوحًا ؟ (ب) ما هى المقاومة المكافئة للدائرة عندما يكون المفتاح S مغلقًا ؟ (جـ) ما هو فرق الجهد عبر R_1 عندما يكون المفتاح S مغلقًا ؟



شكل م 10–18

القسم 11–18

62 وصل مصباح مقاومته $192\ \Omega$ ومحمصة خبز مقاومتها $16\ \Omega$ ومروحة مقاومتها $60\ \Omega$ على التوازى فى دائرة منزلية تغذيتها 120 V أوجد (أ) مجموع التيارات المسحوبة فى الدائرة ، (ب) فرق الجهد عبر محمصة الخبز ، (جـ) التيار المار فى المروحة ، (د) الطاقة المبددة بواسطة محمصة الخبز .

63 دائرة خاصة يغذيها 120 V وبها محمصة خبز 1200 W ومصباح 60 W ، ومكواة لحام 600 W وكلها تعمل معًا فى نفس الوقت . ويحترق المصهر (الفيوز) عند إشعال بصيلة إضافية قدرتها 40 W . ما أقصى تقدير لتحمل المصهر ؟

64 منزل به مجفف قدرته 1500 W وغسالة قدرتها 540 W وخمسة مصابيح إضاءة قدرة كل منها 40 W ، وجهاز تليفزيون قدرته 25 W وكلها تستمد طاقتها من نفس الخط الذى يوفر 120 V . ما هو أدنى تيار يجب أن يوصل المصهر (الفيوز) على أساسه ؟

65 ما عدد البصيلات ذات القدرة 75 W التى يمكن استخدامها فى منزل دون أن يحترق المصهر الذى تياره المقرر 15 A ؟

■ 66 جهاز كهربائى مصمم لأن يستهلك 2000 W من القدرة عندما يعمل عند جهد مقداره 240 V . (أ) إذا اعتبرت أن مقاومة الجهاز تظل ثابتة فما هو مقدار ما تسحبه من تيار إذا وصلت بمصدر جهده 120 V ؟ (ب) وما مقدار القدرة التى تستهلكها فى هذه الحالة ؟

■ 67 دائرة منزلية تعمل بجهد مقداره 120 V وتحتوى على قاطع دائرة يتحمل حتى 30 A . ثم أديرت مكواة قدرتها 1500 W وشواية كهربائية قدرتها 2000 W ومصباح فى نفس الوقت . فما هى أقصى قدرة للبصيلة يمكن استعمالها دون أن يعمل قاطع الدائرة ؟

القسم 18-12

68 عندما يسحب تيار مقداره 3.2 A من بطارية معينة فإن جهدها الطرفي يهبط من قيمته المناظرة لتيار قيمته صفر وهى 1.57 V إلى 1.28 V . ما هى المقاومة الداخلية للبطارية ؟

69 ما هو أقصى تيار يمكن سحبه من بطارية قوتها 1.57 V ومقاومتها الداخلية 0.1Ω ؟

■ 70 مقاوم 7 Ω يسحب تيارًا مقداره 0.2 A عندما يوصل ببطارية . وعند توصيل نفس البطارية بمقاوم 4.5 Ω فإن التيار يصبح 0.3 A فى الدائرة . أوجد (أ) القوة الدافعة الكهربية (emf) و (ب) المقاومة الداخلية للبطارية .

■ 71 مصباح جيب يعمل بثلاث بطاريات من الحجم AA متصلة على التوالى وقوة كل منها 1.5 V وعند إضاءة المصباح فإنه يسحب تيارًا مقداره 0.5 A ويهبط الجهد الطرفى للبطاريات إلى 3.3 V . ما هى المقاومة الداخلية لكل بطارية ؟

■ 72 الجهد الطرفى لبطارية معينة هو 11.52 V عندما تكون متصلة بمقاوم 24 Ω ويكون 11.76 عند توصيلها عبر مقاوم 50 Ω . أوجد (emf) للبطارية وكذا مقاومتها الداخلية .

73 يسحب مقاوم 58 Ω تيارًا مقداره 150 mA عندما يتصل عبر بطارية 9 V . (أ) ما هى المقاومة الداخلية للبطارية ، (ب) كم يصير الجهد الطرفى للبطارية عند توصيلها بالمقاوم ؟

مسائل إضافية

■ 74 يرتفع التيار المار خلال مقاوم ما بمقدار 2 A عندما يرتفع فرق الجهد عبر ذلك المقاوم من 8 V إلى 12 V . ما هى مقاومة المقاوم ؟

■ 75 لديك ثلاثة مقاومات هى 3 Ω ، 5 Ω و 8 Ω . (أ) ما عدد القيم المختلفة للمقاومة يمكنك الحصول عليها باستخدام هذه المقاومات ؟ (ب) ما هى هذه القيم وكيف تتصل المقاومات معًا فى كل حالة ؟

■■ 76 كانت المقاومة المقاسة لسلك معدنى ما طوله وقطرة الابتدائيين هما L_0 ، d_0 على الترتيب ، هى 4 Ω . ثم شد السلك تحت تأثير إجهاد شد إلى أن أصبح قطره منتظمًا ومقداره $0.4\ d_0$. أوجد القيمة الجديدة لمقاومة السلك .

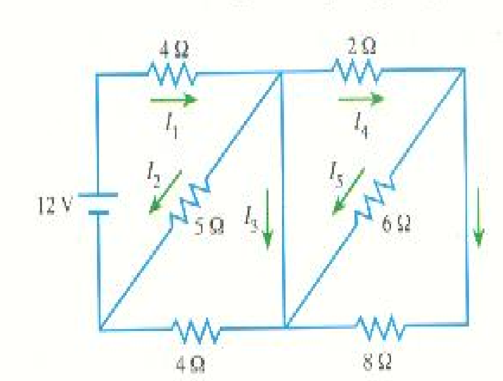
تلميح : لاحظ أن الحجم الكلى وكتلة المعدن للسلك لا يتغيران تحت تأثير إجهاد الشد .

■■ 77 يراد صنع مقاوم لا يعتمد على درجة الحرارة وتكون مقاومته 40 Ω وسيكون على هيئة مقاوم جرافيتى متصل على التوالى مع مقاوم من التنجستين . ما هى قيم المقاومة التى يجب أن يكون عليها كل مقاوم عند 20°C ؟

■■ 78 سلك معدنى دقيق نصف قطره $r = 3.8 \times 10^{-2}$ mm وصل طرفاه ببطارية فسحب تيارًا مقداره 3.6 A ، وكان المجال الكهربى القائم بطول السلك هو 84 V/m . أوجد مقاومية مادة السلك .

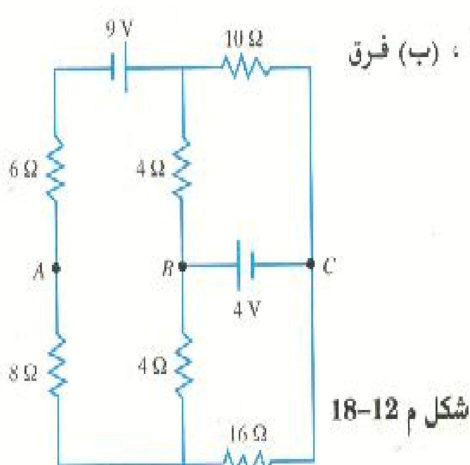
■■ 79 وصِّل مقاوم من الجرافيت على التوالي مع مقاوم من الحديد Ω 9 (عند 20°C) كم يجب أن تكون مقاومة المقاوم الجرافيتي حتى تكون المجموعة ذات مقاومة لا تعتمد على درجة الحرارة ؟ وما هي مقاومة المجموعة ؟

■■ 80 عين قيم التيارات I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 ، I_5 و I_6 في الشكل م 11–18 .



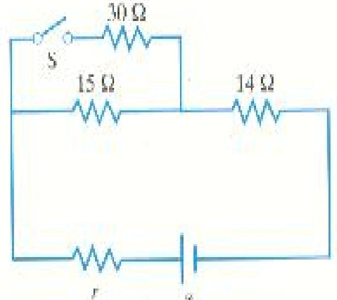
شكل م 11–18

■■ 81 في الشكل م 12–18 احسب (أ) فرق الجهد بين النقطتين A و B ، (ب) فرق الجهد بين النقطتين A و C ، (جـ) القدرة الواصلة إلى المقاوم Ω 16 .



شكل م 12–18

■■ 82 في الشكل م 13–18 كان الجهد الطرفي لبطارية ما عند قياسه V 5.8 عندما كان المفتاح S مفتوحًا وكان V 5.76 عندما كان مغلقًا . أوجد القوة الدافعة الكهربية $\mathscr{E}$ والمقاومة الداخلية r للبطارية .



شكل م 13–18

الفصل التاسع عشر



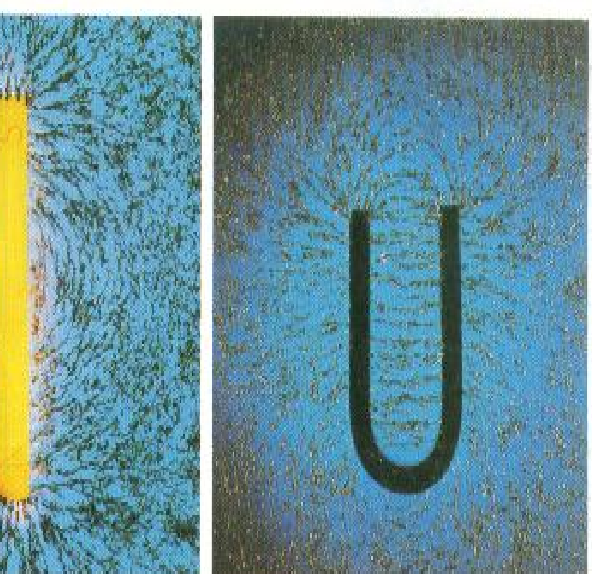
المغناطيسية

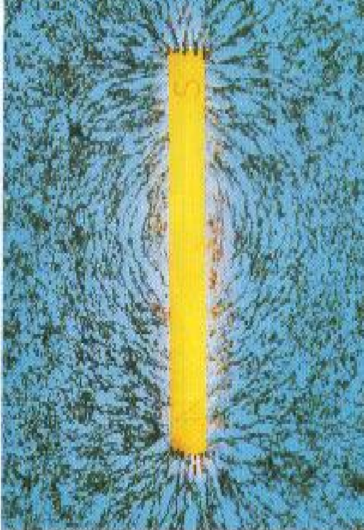
أجرينا ونحن أطفال فى المدرسة الابتدائية تجارب بسيطة تتناول المغناطيسية ، وقد عرفنا أن القضيب المغناطيسى له قطبان ، قطب شمالى وقطب جنوبى . ثم أدركنا بعد ذلك أن الأقطاب المختلفة تتجاذب مع بعضها البعض ، وأن الأقطاب المتشابهة تتنافر . وعرفنا أيضًا أن الكرة الأرضية تعمل كمغناطيس هائل وأن إبرة البوصلة المغناطيسية تصطف بامتداد المجال المغناطيسي للأرض .

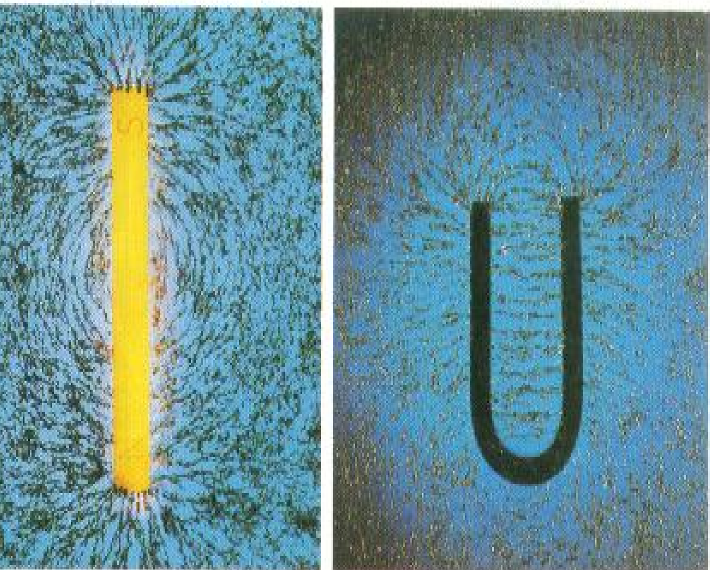
وعندما نثرنا بعض برادة الحديد على لوح زجاجي موضوع فوق مغناطيس اكتشفنا أن البرادة كونت صورة للمجال المغناطيسى المحيط بالمغناطيس . وقد عرفت معظم هذه الحقائق منذ آلاف السنين . على أن الأمر تطلب الانتظار حتى عام 1820 عندما اكتشف العلماء أن المغناطيسية وثيقة الصلة بالتيارات والمجالات الكهربية . بل إنه حتى يومنا هذا ، فإن العلماء لا يزالون يقومون باكتشافات فيما يتعلق بالمغناطيسية والمواد التى تصنع منها المغناطيسيات . وسوف نرى فى الفصول القادمة أن المغناطيسات وتأثيراتها ليست سوى جانب صغير من جوانب المغناطيسية .

19-1 تخطيط المجال المغناطيسي

لقد صكت معظم مصطلحات المغناطيسية منذ عدة قرون على أيدى أولئك الذين بادروا ببحث سلوك المغناطيسات . وكانت المغناطيسات الأولى مجرد قطع من الصخور الحاملة للحديد وأطلق عليها عندئذ حجر المغناطيس . ونعرف الآن أن الحديد واحد من مواد قليلة لها خاصية القدرة على التمغنط بشكل دائم . وهذه المواد التى تشمل النيكل والكوبالت تسمى مواد فيرومغناطيسية (كلمة « فيروم » اللاتينية معناها « حديد ») .





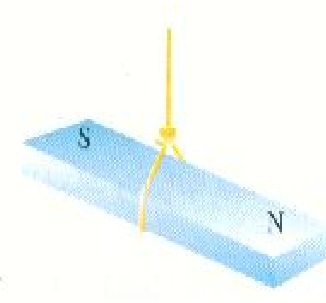


تتوجه قطع برادة الحديد بواسطة المجالات المغناطيسية لمغناطيس على هيئة قضيب أو حدوة حصان مشكلة بهذا أنماط المجالات .

يكون لقطع من خام الماجنتيت ، المسمى بحجر المغناطيس ، مجال مغناطيس دائم يجذب إليه إبرة البوصلة .

وقد عرف من قديم الزمن أن قطعًا مستطيلة من حجر المغناطيس يمكن أن تعلق بواسطة خيط ، ويستخدم كبوصلة بدائية يستعان بها فى تحديد اتجاه يناظر الشمال الجغرافى ، وكما يحدث بالنسبة لإبرة البوصلة المغناطيسية فى عصرنا الحالى ، فإن حجر المغناطيس يتوجه بحيث يصطف طوله مع المجال المغناطيسي للأرض وقد أطلق على طرفى المغناطيس المصنوع من حجر المغناطيس **الأقطاب** المغناطيسية ، فصار القطب الذى يشير تقريبًا نحو القطب الشمالى الجغرافى هو القطب الشمالى المغناطيسى ، أما الطرف المقابل له فسمى القطب الجنوبى للمغناطيس . وقد احتفظنا إلى يومنا هذا بهذه التسميات عند الإشارة إلى خواص القضبان المغناطيسية وإبرة البوصلة (انظر الشكل 1-19) .

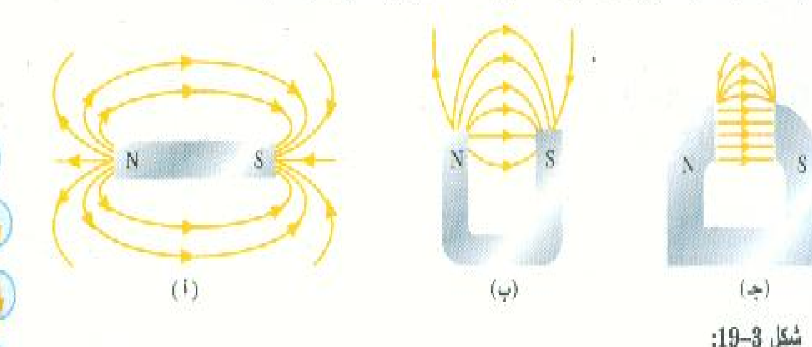
وقد أوضحت الدراسات التالية للمغناطيسية أن القطبين المتشابهين (القطبين الشماليين أو القطبين الجنوبيين) يتنافران مع بعضهما البعض بينما يتجاذب القطبان المختلفان . ويذكرنا هذا المسلك بما يحدث فى حالة نوعى الشحنة الكهربية ، وقد دفع هذا العلماء إلى محاولة العثور على « شحنات » مغناطيسية أو أقطاب أحادية . على إننا إذا حاولنا أن نفصل قطبى مغناطيس وذلك بكسر المغناطيس إلى نصفين ، فإن جهودنا ستبوء بالفشل ، لأن المغناطيس المكسور سيصبح مغناطيسين جديدين ولكل منهما قطب شمالى وآخر جنوبى .



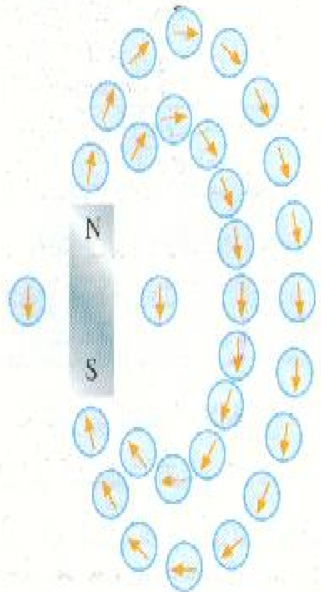
شكل 1-19:
يعرّف القطب الشمالى لمغناطيس ما بأنه القطب الذى يشير نحو الشمال على الكرة الأرضية عندما يعلق المغناطيس تعليقًا حرًا .

وتحدث أشياء مثيرة للاهتمام بالقرب من المغناطيسات ، فقطع الحديد غير المغنطة كالمسامير أو برادة الحديد تنجذب إلى كلا القطبين . أما إبرة البوصلة فهى تنحرف إذا اقترب منها قضيب مغناطيسى . والسلك الذى يمر خلاله تيار كهربى يتجاذب أو يتنافر مع المغناطيسات ، وتيارات الجسيمات المشحونة يمكن حرفها بواسطة المغناطيسات ، ومن المناسب تفسير كل هذه الظواهر بدلالة ما نطلق عليه **المجال المغناطيسي** للمغناطيس .

وكما هى العادة دائمًا ، سنبدأ بتعريف المجال ، وإن كان ذلك اختياريًا ، بدلالة خاصية قابلة للقياس . وفى هذه الحالة فإننا نعرف **اتجاه المجال المغناطيسى** عند أية نقطة بأنه الاتجاه الذى تأخذه إبرة البوصلة إذا وضعت فى تلك النقطة . افترض ، مثلاً ، إننا نود تخطيط اتجاه المجال المغناطيسى بجوار قضيب مغناطيسى كالمبين فى الشكل 19-2 . ويمكننا عمل ذلك إذا وضعنا عددًا كبيرًا من إبر البوصلة الدقيقة الحجم عند نقط متعددة حول المغناطيس وملاحظة اتجاهها . وسوف نعتبر تأثير الإبر على بعضها البعض مهملاً إذا قورن بتأثير القضيب المغناطيسى على كل منها .



شكل 19-3:
يشير المجال المغناطيسى ــ حسب التعريف ــ مبتعدًا عن القطب الشمالى ومتجهًا نحو القطب الجنوبى .



شكل 19-2:
يمكن تحديد اتجاه المجال المغناطيسى بالقرب من مغناطيس باستخدام عدد كبير من إبر البوصلة دقيقة الحجم .

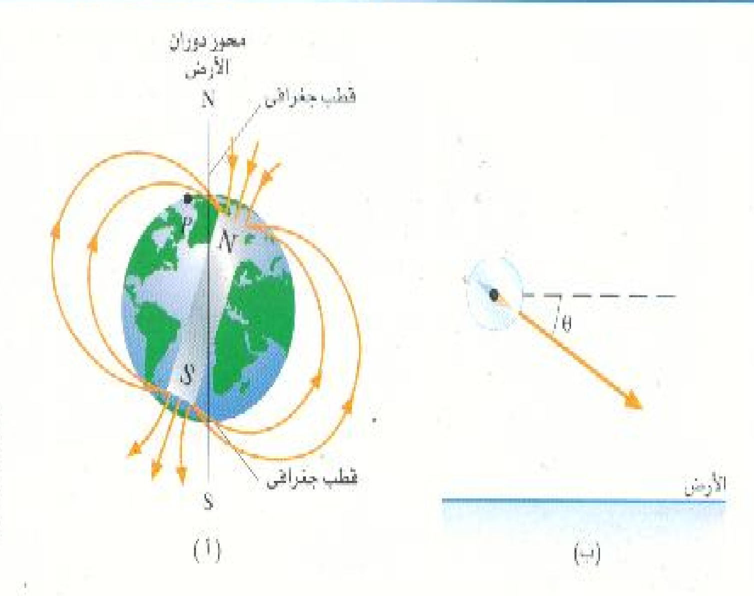
وإذا كان الطرف المحدد برأس السهم فى إبرة بوصلة هو القطب الشمالى فإنه لابد أن يتنافر مع القطب الشمالى للمغناطيس ، ومن ثم فإبرة البوصلة الموضوعة بالقرب من القطب الشمالى لمغناطيس تشير بعيدًا عنه . وبالمثل فإن الإبرة الموضوعة بالقرب من القطب الجنوبى تشير نحوه لأن الأقطاب المختلفة تتجاذب . ولكى نخطط المجال المغناطيسى فإننا نرسم سلسلة من الخطوط حول المغناطيس بحيث تكون الأسهم المرسومة على تلك الخطوط فى الاتجاه الذى تشير إليه إبرة البوصلة . وهذه الخطوط التى يطلق عليها **خطوط المجال المغناطيسى** ، ترى موضحة بالشكل 19-3 لثلاثة مغناطيسات ذات أشكال مختلفة . ومثلما دلت إبر البوصلات التى عرفتها فإن :

تتجه خطوط المجال المغناطيسى كما لو كانت خارجة من القطب الشمالى للمغناطيس وداخلة إلى القطب الجنوبى .

وتوضح المخططات كالتى ترى فى الشكل 19-3 ليس اتجاه المجال فحسب وإنما شدته أيضًا . وكما كان الحال مع المجال الكهربى فإن خطوط المجال المغناطيسى تكون أكثر تكدسًا حيث يكون المجال أشد ما يمكن .

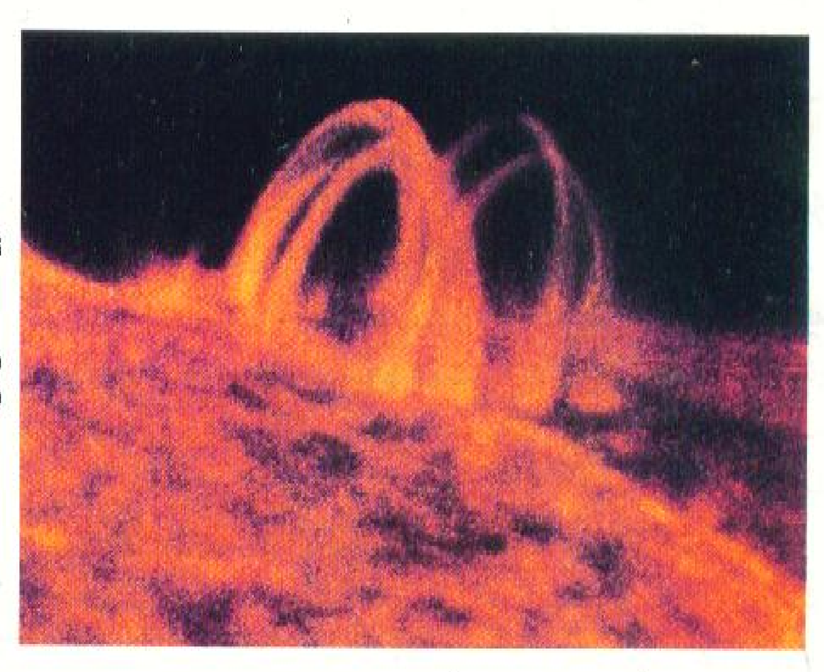
19-2 المجال المغناطيسى للأرض

يبين الشكل 19-4 مخططًا للمجال المغناطيسى للأرض . ويلاحظ أن نمط المجال شديد الشبه بذلك الخاص بقضيب مغناطيس . ويلاحظ أن الأقطاب المغناطيسية لا تنطبق على الأقطاب الجغرافية التى تتحدد بواسطة محور دوران الأرض .



شكل 4-19:
(أ) المجال المغناطيسي للأرض .
(ب) زاوية الميل هي الزاوية المحصورة بين المجال المغناطيسي B والخط الأفقي .

وسنقف الآن لحظة لنزيل مصدرًا هامًا للتشوش . لقد اعتدنا على القول بأن القطب الشمالي لإبرة البوصلة يشير نحو (أو ينجذب إلى) القطب الشمالي المغناطيسي للأرض وهذا طبعًا يتعارض مع ما هو ملاحظ من أن الأقطاب المتشابهة تتنافر . وينشأ اللبس لأننا نشير إلى القطب المغناطيسي القريب من القطب الشمالي الجغرافي على أنه القطب الشمالي المغناطيسي لمجال الأرض . فإذا ظللنا متمسكين بتعريفنا للقطب الشمالي للبوصلة على أنه القطب الذي يشير نحو الشمال لوجب أن نسمي هذا القطب بالقطب الجنوبي المغناطيسي للأرض . على أن تغيير المسميات التاريخية سيؤدي بلا شك إلى مزيد من اللبس أكثر مما يسببه الاعتراف بخطأ التسمية والتعايش معه .



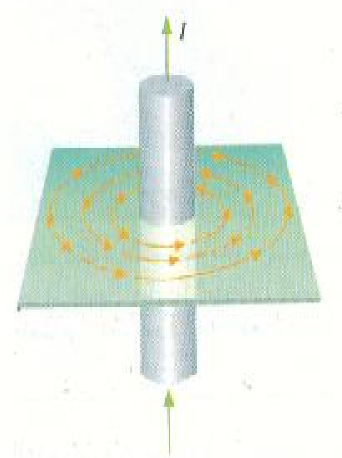
تقتنص المجالات المغناطيسية الجسيمات المشحونة كتلك التي توجد في الغازات الساخنة المنبعثة في جو الشمس . وحيث أن الغازات الساخنة تبعث ضوءًا فإنها بذلك تشي بتركيب المجال المغناطيسي للشمس كما تبينه عرى الشواظ الشمسي في الصورة . ويقيم الشواظ الشمسي جسرًا بين البقع الشمسية وهي مناطق ذات مجالات مغناطيسية شديد لأقطاب مغناطيسية متعاكسة .

ويتغير موقع الأقطاب المغناطيسية للأرض على مدى فترات زمنية طويلة ويقع القطب الشمالي حاليًا على نحو 1600 km جنوب القطب الشمالي الجغرافي على امتداد خط الطول 100° غربًا . فإذا كنت عند خط طول آخر غير هذا الخط فإن البوصلة التي معك

لابد من تصحيح قراءتها نحو انحراف الشرق أو انحراف الغرب حتى يمكن معرفة اتجاه الشمال الحقيقي . ويسجل مقدار هذا التصحيح على خرائط مخصصة للملاحة .

وكما هو موضح بالشكل 4-19 فإن المجال المغناطيسي للأرض يكون موازيًا تقريبًا لسطح الأرض في المناطق الاستوائية ويكون عموديًا تقريبًا على سطح الأرض بالقرب من القطبين . وعلى وجه العموم ، فإن إبرة البوصلة المعلقة على محور أفقي عند النقطة P في نصف الكرة الشمالي سوف تشير بزاوية مقدارها θ أسفل الخط الأفقي . وتسمى هذه الزاوية بزاوية ميل المجال المغناطيسي للأرض .

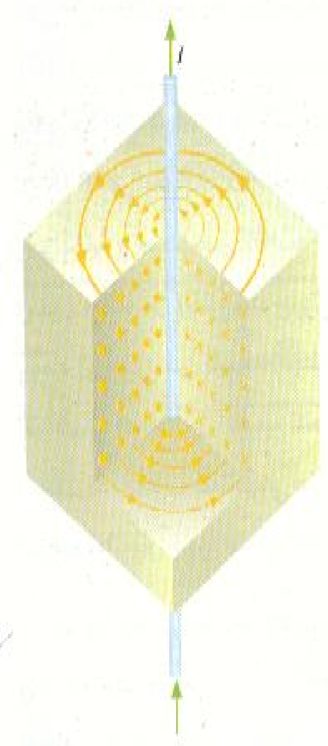
19-3 المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار كهربي



شكل 5-19:
يكوّن المجال المغناطيسي دوائر متمركزة حول السلك الحامل للتيار .

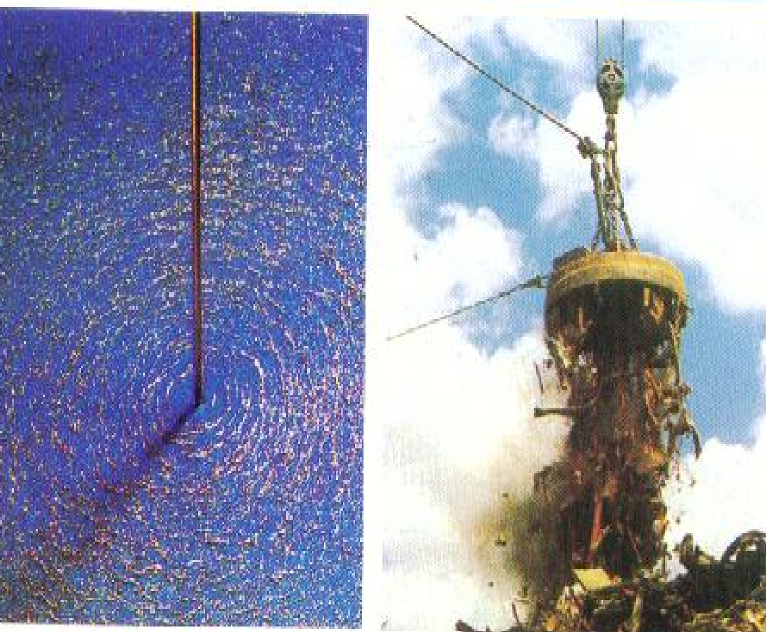
ليست المغناطيسيات هي المصدر الوحيد للمجالات المغناطيسية ، فقد اكتشف هانز كريستيان أورستد عام 1820 أن التيار الكهربي المار في سلك ما يجعل إبرة بوصلة قريبة منه تنحرف . ويدل هذا على أن **التيار الكهربي المار في سلك قادر على توليد مجال مغناطيسي** . وقد كانت تجربة أورستد هي أول بيان عملي على أن الظواهر الكهربية والمغناطيسية وثيقة الصلة ببعضها البعض . وقد أصبحنا نعرف الآن ، بناء على العديد من أنواع التجارب الأخرى أن التيارات الكهربية تخلق بالفعل مجالات مغناطيسية . وبالإضافة إلى كل هذا فالمجال المغناطيسي لمغناطيس ما هو أيضا نتيجة حركة الشحنات كما سنرى لاحقا .

لقد درس أورستد المجال المغناطيسي الذي يحيط بسلك مستقيم ، طويل يمر داخله تيار في الاتجاه المبين في الشكل 5-19 . وعندما توضع بوصلة بجوار السلك فإن الإبرة ستستقر بحيث يكون طولها منطبقًا مع المماس لدائرة متحدة المركز مع السلك . والنتيجة هي أن المجال المغناطيسي يتواجد في شكل دوائر حول السلك وكما هو متوقع فإن شدة المجال تكون أعظم ما يمكن بالقرب من السلك ؛ ويوضح الشكل 6-19 صورة ثلاثية الأبعاد للمجال المغناطيسي . (وفي هذا الرسم وما يأتي بعد ذلك من رسوم توضيحية فإن الرمز (•) يدل على أن السهم يتجه نحو القارئ بينما يدل الرمز (×) على أن السهم متجه بعيدًا عن القارئ والرمزان يعبران عن مقدمة السهم ومؤخرته وهي التي تبين اتجاه المجال المغناطيسي) .



شكل 6-19:
يلتف المجال المغناطيسي في دوائر حول سلك مستقيم طويل . ويتناقص المجال كلما ابتعدنا عن السلك .

هناك قاعدة بسيطة هي **قاعدة اليد اليمنى** وتستخدم لتذكر اتجاه المجال المغناطيسي حول سلك ما . فإذا كنت قابضًا على السلك بيدك اليمنى وكان إبهامك يشير إلى اتجاه التيار فإن الأصابع المضمومة ستمثل الدوائر المحيطة بالسلك في اتجاه المجال (الشكل 7-19) .



يمكننا توليد مجالات مغناطيسية شديدة بواسطة تيارات ضخمة ، مثل هذا المغناطيس الكهربى الصناعى ، المستخدم فى التقاط الحديد الخردة .



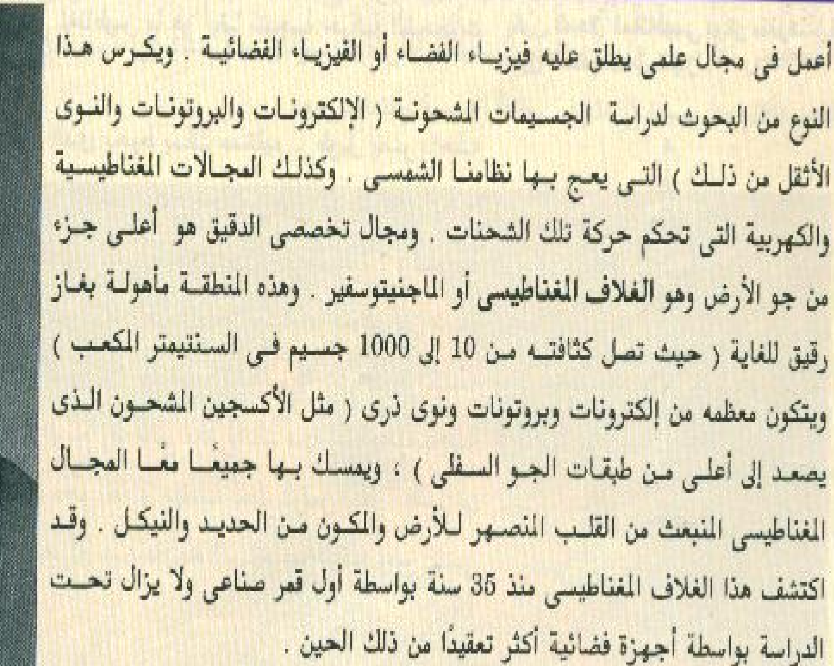
تصطف برادة الحديد تحت تأثير المجال المغناطيسى الناتج عن التيار المار فى السلك المستقيم .



شكل 7-19:
عندما تقبض على سلك حامل لتيار فى يدك اليمنى فإن الإبهام يشير إلى اتجاه التيار بينما تلتف الأصابع حول الشكل فى نفس اتجاه المجال المغناطيسى .

الفيزيائيون يعملون دانيال . ن . بيكر معمل الفيزياء الجوية والفضائية بجامعة كولورادو





أعمل فى مجال علمى يطلق عليه فيزياء الفضاء أو الفيزياء الفضائية . ويكرس هذا النوع من البحوث لدراسة الجسيمات المشحونة (الإلكترونات والبروتونات والنوى الأثقل من ذلك) التى يعج بها نظامنا الشمسى . وكذلك المجالات المغناطيسية والكهربية التى تحكم حركة تلك الشحنات . ومجال تخصصى الدقيق هو أعلى جزء من جو الأرض وهو **الغلاف المغناطيسى** أو الماجنيتوسفير . وهذه المنطقة مأهولة بغاز رقيق للغاية (حيث تصل كثافته من 10 إلى 1000 جسيم فى السنتيمتر المكعب) ويتكون معظمه من إلكترونات وبروتونات ونوى ذرى (مثل الأكسجين المشحون الذى يصعد إلى أعلى من طبقات الجو السفلى) ؛ ويمسك بها جميعًا معًا المجال المغناطيسى المنبعث من القلب المنصهر للأرض والمكون من الحديد والنيكل . وقد اكتشف هذا الغلاف المغناطيسى منذ 35 سنة بواسطة أول قمر صناعى ولا يزال تحت الدراسة بواسطة أجهزة فضائية أكثر تعقيدًا من ذلك الحين .

وقد بدأ شغفى ببحوث الفضاء وأنا لا زلت طفلاً فى التاسعة عام 1957 عندما قرأت عن بعثة « سبوتنيك » الروسية وعن اكتشاف جيمس فان آلن للأحزمة الإشعاعية حول الأرض . وقررت عندئذ أننى أحب أن أصبح متخصصًا فى فيزياء الفضاء ، بل وأن أعمل مع البروفيسور فان آلن يومًا ما وقد كنت محظوظًا للغاية أن أتمكن من الدراسة مع البروفسيور فان آلن عندما التحقت بالدراسات العليا عام 1970 ، واشتركت معه فى تصميم واختبار الأجهزة التى أطلقت فيما بعد فى أول بعثة إلى النظام الشمسى الخارجى . وقد أثبتت سفينتنا الفضاء « بايونير 10 و 11 » أن كوكبى المشترى وزحل لهما أيضًا غلاف مغناطيسى

« ماجنيتوسفير » . ونعتقد حاليًا أن كل الكواكب لها فى الواقع مناطق تشبه الغلاف المغناطيسى ، ونعرف أيضًا أن شمسنا والنجوم النيوترونية وحتى المجرات لها ـ فى الحقيقة ـ مناطق تحيط بها ويمكن أن يطلق عليها بحق أغلفة مغناطيسية .

وأحد أعظم الفوائد التى نجنيها من دراسة الغلاف المغناطيسى للأرض هو أنه قريب نسبيًا من كوكبنا ، ولكى نبعث بسفينة فضاء إلى كواكب أخرى (مثلما حدث مع بعثات فويجر وبايونير) فإن الأمر يستغرق سنوات أو حتى عقود لأن الكواكب بعيدة جدًا عنا . ولنتخيل ـ مجرد تخيل ـ محاولة الذهاب إلى نجوم أخرى : إن السفر ـ ولو بسرعة الضوء ـ سوف يستغرق عشرات وربما مئات السنين لكى نصل إلى أقرب نظام نجمى منا . وتتيح لنا دراسة العمليات التى تجرى فى الغلاف المغناطيسى للأرض . أن نفكر فى أنماط لتعجيل (لتسارع) ، وتحويل الطاقة ، والحركة المركبة للجسيمات المشحونة وأهم من ذلك كله أننا سنكون عندئذ قادرين على إرسال أجهزة إلى الغلاف المغناطيسى للتحقق من أفكارنا ونماذجنا النظرية أن الغاز المكون من جسيمات مشحونة والمجال المغناطيسة ، الموجود فى الغلاف المغناطيسى للأرض (وهو ما يسمى **بلازما**) يعتبر سمة مميزة لنحو 99 فى المائة من الكون أى أن ما نصل إليه من نتائج يمكن تطبيقه على نظم كونية أخرى . ونستطيع القول من هذا المنظور أن الغلاف المغناطيسى للأرض أو الماجنيتوسفير ما هو إلا معمل كونى عملاق .

ولقد صار البشر يستخدمون البيئة الفضائية أكثر فأكثر منذ أن بدأ عصر الفضاء . فقد أصبح لدينا الآن أقمار صناعية فى الفضاء تساعد على البث التليفزيونى على مستوى العالم أجمع ، كما أن لدينا اتصالات فورية تقريبًا بين مختلف القارات . ويستخدم الفضاء أيضًا للمراقبة ليساعدنا فى الدفاع عن أنفسنا ، وتقوم بعض سفن الفضاء المعقدة بتحذيرنا من الأعاصير ، والكوارث الضخمة المرتبطة بالظواهر الجوية . بل ويتم مراقبة التغيرات ذات المدى البعيد فى جو الأرض والمحيطات والحياة النباتية ، بشكل منتظم من الفضاء وقد توصلنا إلى أن كل هذه الوظائف المعقدة لاستخدام الفضاء معرضة بشدة للأشعة العدائية القادمة من الفضاء ؛ ومنها ـ مثلاً ـ جسيمات حزام فان آلن والانطلاقات العنيفة للإشعاع المرتبط بالانفجارات الشمسية وكلها قادرة على تدمير المكونات الإلكترونية للأقمار الصناعية تمامًا . وهكذا فإن من المظاهر التطبيقية لعملى ، فهم والتنبؤ بتأثيرات البيئة الفضائية على الأقمار الصناعية العاملة .

واعتبر نفسى محظوظًا للغاية لأننى كنت قادرًا على إدراك الحلم الذى بدأ مع فجر عصر الفضاء . فقد أتيحت لى الفرصة لدراسة المشترى وزحل وعطارد والشمس بالإضافة إلى الأرض . وعند إجراء المقارنات والمقابلات بين جيراننا فى الفضاء ، فإننا توصلنا إلى فهم جيد للركن الضئيل الذى نحتله من الكون . ونتطلع حاليًا إلى ما هو أبعد فأبعد باستخدام التلسكوبات الأكثر قوة ولكننا نعود دائمًا إلى خبراتنا ببيئة الأرض حتى نستوعب ما نراه . ولهذا قد يكون أكثر ما يثير الاهتمام هو أنه مهما فتحنا من نوافذ لنطل على الفضاء ، سنظل دائمًا ننظر من خلال النافذة التى فتحناها من فوق كوكبنا الأرض .

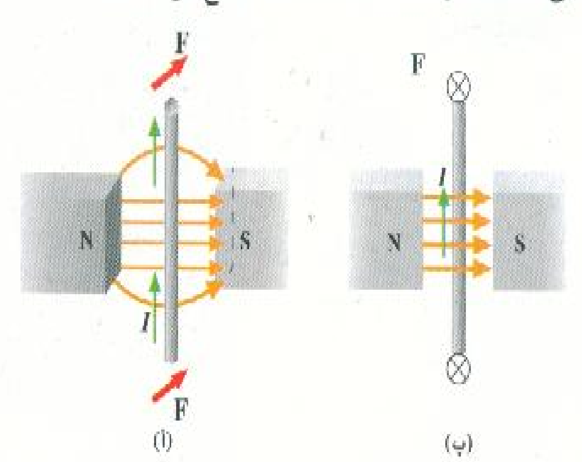
19-4 القوة المؤثرة على تيار يمر فى مجال مغناطيسى خارجى ؛ قاعدة اليد اليمنى

لم نناقش حتى الآن سوى الملامح الوصفية للمجال المغناطيسى وكيفية تحديد اتجاهه ولكى يكتمل الوصف لابد أن نبحث عن وسيلة لتحديد وقياس مقدار هذا المجال ويكمن الحل فى ما لوحظ من أن السلك الحامل للتيار إذا وجد فى منطقة بها مجال* مغناطيسى فإن السلك يتعرض لقوة ما .

يتعرض السلك الحامل لتيار خلال منطقة بها مجال مغناطيسى خارجى لقوة بسبب ذلك المجال .

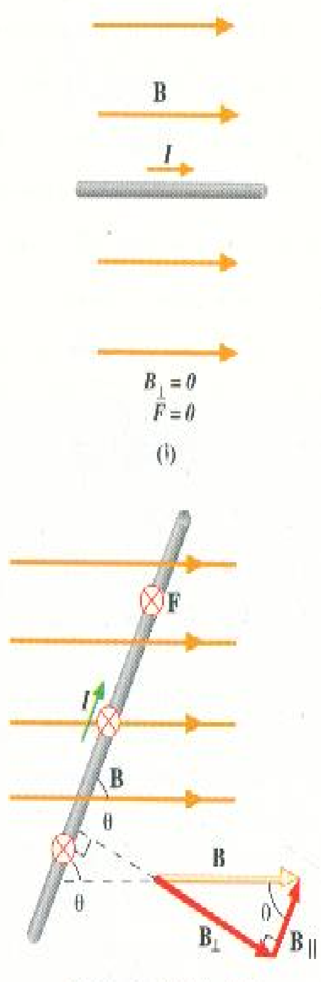
* المجال المغناطيسى الخارجى هو ما يمكن إيجاده بواسطة تيارات أو مغناطيسات تقع خارج نطاق السلك الحامل للتيار . ولا يشمل هذا المجال الخارجى المجال الذى ينشؤه التيار المار فى السلك نفسه .

وكمثال على هذه الظاهرة دعنا نتدبر الموقف الموضح فى الشكل 8-19 (أ) .



شكل 8-19:
المجال المغناطيسى الخارجى (الخطوط البرتقالية) الذى يسببه قطبا القضيب المغناطيسى هو الذى يجعل السلك الحامل للتيار يتعرض لقوة . (أ) رسم منظور ثلاثى الأبعاد . (ب) منظر جانبى ، يوضح أن B ، I و F فى تعامد متبادل فيما بينهما .

وُضع السلك الحامل للتيار I الذى يمر رأسيًا إلى أعلى فى مجال مغناطيسى خارجى موجود بين قطبى مغناطيس . وتدل التجارب على أن السلك يتعرض لقوة متعامدة مع كل من المجال المغناطيسى واتجاه التيار . وإذا عكس اتجاه التيار فإن اتجاه القوة ينعكس هو الآخر بحيث يكون خارجًا من الصفحة ويمكننا ملاحظة ذلك بوضوح أكبر إذا رسمنا الموقف فى بعدين ، كما فى الشكل 8-19 (ب) . ويلاحظ أن خط السلك وخط المجال المغناطيسى الذى يتقاطع معه يحددان مستوى ، وهو مستوى الصفحة . والقوة التى يتعرض لها السلك تكون متعامدة دائمًا على هذا المستوى ؛ وفى هذه الحالة بالذات تتجه القوة إلى داخل الصفحة . وسنتناول اتجاه هذه القوة بمزيد من التفصيل فى القسم التالى . أما الآن فسنركز على مقدار هذه القوة وتعريف مقدار المجال المغناطيسى .



وسنعتبر ـ من أجل البساطة ـ أن شدة المجال المغناطيسى الخارجى منتظمة على امتداد طول السلك L . فإذا كان التيار والمجال المغناطيسى متعامدين كما فى الشكل 8-19 ، فقد وجد أن القوة المؤثرة على السلك تتناسب مع كل من التيار وطول السلك الموجود داخل المجال المغناطيسى . وسوف نستخدم الرمز **B** فى الدلالة على المجال المغناطيسى ، ونعرِّف مقدار (أو شدة) المجال كما يلى :



$$B = \frac{F}{IL} \qquad (\mathbf{I} \text{ متعامد } \mathbf{B})$$

وتدل هذه المعادلة على أن وحدات B هى قوة لكل متر أمبير وتسمى تسلا (T) فى النظام الدولى للوحدات (SI) :

$$1\,T = 1\,N/m\,.\,A$$

شكل 9-19:
عندما يكون السلك الحامل للتيار منغمسًا فى مجال مغناطيسى خارجى فإن القوة المؤثرة على السلك تتناسب مع مركبة **B** المتعامدة مع السلك . حدد اتجاه **F** فى الجزء (ب) من الشكل 9-19 .

وقد نقابل أحيانًا وحدات غير وحدات SI للمجال المغناطيسى ، وتسمى هذه الوحدات جاوس (G) حيث تكون $1\,G = 10^{-4}\,T$. ومن قبيل المقارنة فإن المجال المغناطيسى للأرض من الرتبة $5 \times 10^{-5}\,T$ ، فى حين أن B بالقرب من قضيب مغناطيسى قوى قد يصل إلى $0.1\,T$.

أما اتجاه **B** فقد حددناه بالفعل من قبل على أنه الاتجاه الذى تشير إليه إبرة البوصلة . وهكذا يكتمل لدينا وصف متجه المجال المغناطيسى **B** .

وخطوط المجال (ومن ثم **B**) فى الشكل 8-19 متعامدة مع اتجاه التيار (أى مع السلك) . وسنحاول أن نعرف ما يحدث عندما لا يكون الاثنان متعامدين . سنفترض أن خطوط المجال تتوازى مع السلك كما فى الشكل 9-19 (أ) . فى هذه الحالة لا يتعرض السلك لأية قوة . **أى أن التيار الموازى (أو الموازى ومتضاد) لخط مجال مغناطيسى خارجى لا يتعرض لأية قوة ناتجة عن هذا المجال** . ومن الواضح أن الاتجاه النسبى لخطوط المجال واتجاه التيار ذات تأثير بالغ .

إذا كانت الزاوية المحصورة بين **I** و **B** هى θ ، فإن القانون العام للقوة التى يؤثر بها المجال على السلك هى

$$F = BIL \sin \theta$$

وكما يوضح الشكل 9-19 (ب) فإن هذه العلاقة مكافئة للعلاقة :

$$F = B_{\perp}IL \qquad (19\text{-}1)$$

يلاحظ أن هذه العلاقة متفقة مع الحالتين الحديثين ؛ أى عندما $\theta = 0$ ، $(F = 0)$ و $\theta = 90^\circ$ $(F = BIL)$.

مثال توضيحى 1-19

فى الشكل 9-19 (ب) ، افرض أن $B = 2.0\ \text{G}$ ، $\theta = 53^\circ$ ، و $I = 20\ \text{A}$. أوجد القوة المغناطيسية المؤثرة على سلك طوله 30 cm .

استدلال منطقى : نعرف أن $B_{\perp} = B \sin \theta$

$$= B\,(0.799)$$

وبتحويل B إلى وحدات SI ، يصبح لدينا $B = 2.0\ G = 2.0 \times 10^{-4}\ \text{T}$. وإذن :

$$F = B_{\perp}IL = (2.0 \times 10^{-4}\ \text{T})\,(0.799)\,(20\ \text{A})\,(0.30\ \text{m}) =$$

$$= 9.58 \times 10^{-4}\ \text{N}$$

تمرين : أوجد قيمة F إذا كان السلك متعامدًا مع خطوط المجال .

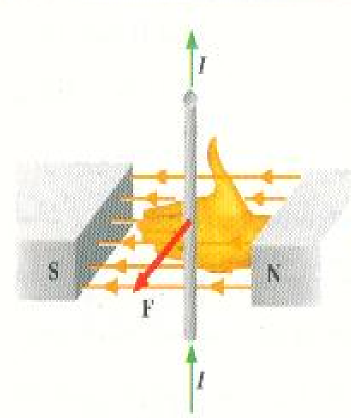
الإجابة : $12.0 \times 10^{-4}\ \text{N}$

5-19 امتداد لقاعدة اليد اليمنى

أشرنا فى القسم السابق إلى أن اتجاه القوة التى يتعرض لها السلك الحامل للتيار فى وجود مجال مغناطيسى يكون متعامدًا على المستوى الذى يحدده كل من السلك والمجال .

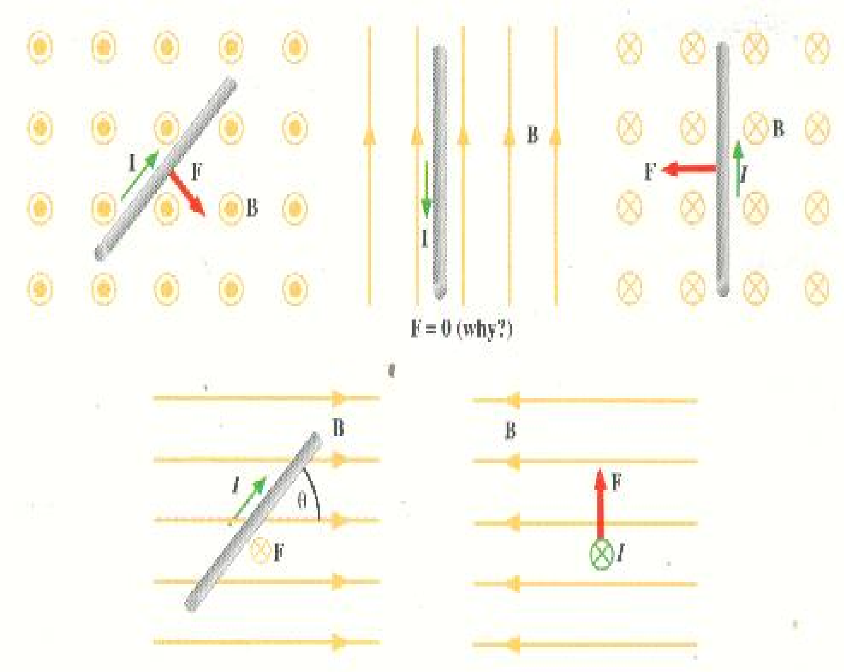
وسنقدم الآن امتدادًا بديهيًا بسيطًا لقاعدة اليد اليمنى (القسم 4-19) يعيننا على تحديد اتجاه القوة التى يتعرض لها السلك . إنها إذن مساعدة بديهية لتذكر اتجاه القوة ، ولا يجب أن نربطها بأى معنى فيزيائى حقيقى ، نظرًا لكونها ـ ببساطة ـ وسيلة تذكر .

اجعل أصابع يدك اليمنى تشير فى اتجاه خطوط المجال المغناطيسى بينما يشير إبهامك فى اتجاه التيار ، أما القوة التى تؤثر على السلك فتكون فى الاتجاه الذى تدفعه راحة يدك .



شكل 10-19:
قاعدة اليد اليمنى : تشير الأصابع فى اتجاه B ، وتشير الإبهام فى الاتجاه العام للتيار وتندفع راحة اليد فى اتجاه F .

وتتمثل هذه القاعدة فى الشكل 10-19 ولا يجب أن يكون لديك الآن أى لبس بشأن هذه النقطة . إن خط متجه المجال المغناطيسى B وخط السلك يحددان معًا مستوى ما (وهو مستوى الصفحة فى الشكلين 9-19 ، 10-19) . وتكون القوة المؤثرة على السلك عمودية دائمًا على هذا المستوى . وبمجرد أن تعرف هذا ، فإن محض التخمين سيتيح لك فرصة نسبتها 50 فى المائة للحصول على الاتجاه الصحيح للقوة ، إذ قد يكون إما داخلة فى الصفحة أو خارجة منها . ولكى تحدد أى البديلين هو الصحيح عليك استخدام القاعدة المصورة فى الشكل 10-19 . واتجاه القوة فى الشكل 10-19 يكون نحوك ، خارجًا من الصفحة وباستخدام نفس القاعدة يمكنك إدراك أن اتجاه القوة فى الشكلين 8-19 و 9-19 إلى داخل الصفحة .



شكل 11-19 :
حدد اتجاه القوة المغناطيسية فى كل حالة .

مثال توضيحى 2-19

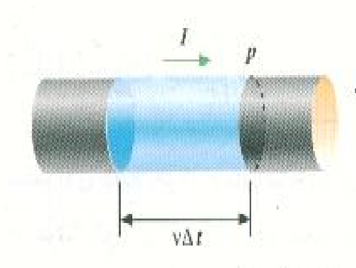
استخدم قاعدة اليد اليمنى لإيجاد القوة المغناطيسية فى الشكل 11-19 . وكما ذكرنا من قبل فإن الرمز ⊗ يدل على متجه فى اتجاه إلى داخل الصفحة والرمز ⊙ يدل على متجه خارج من الصفحة .

19-6 القوى المغناطيسية المؤثرة على شحنات متحركة

التيار - كما عرفناه - هو نتيجة لحركة شحنات موجبة . والسؤال الذى يطرح نفسه بوضوح عند هذه النقطة هو : ما هو أثر مجال مغناطيسى خارجى على شحنات تتحرك بحرية ، إذا لم تكن هذه الشحنات مقيدة بالحركة داخل سلك ولكى نجهز الرد على هذا السؤال علينا أن نبدأ باستخدام ما توصلنا إليه بالفعل فيما يتعلق بالقوة المؤثرة على ناقل شحنة منفرد داخل سلك ما .

ولكى نفعل ذلك فإننا سنقسم القوة الكلية المؤثرة على الطول L على عدد ناقلات الشحنة فى هذا الطول . فإذا كانت مساحة المقطع المستعرض للسلك هى A ، كما فى الشكل 12-19 فإن حجم الطول L منه يكون LA . وإذا كان هناك n_u ناقل شحنة فى وحدة الحجوم ، فإن عدد ناقلات الشحنة فى الطول L هو n_uAL . ومن ثم :

$$\text{القوة المؤثرة على شحنة واحدة} = \frac{\text{القوة المؤثرة على السلك } L}{\text{عدد ناقلات الشحنة فيه}} = \frac{B_\perp IL}{n_u AL} = \frac{B_\perp I}{n_u A}$$



شكل 12-19:
فى زمن مقداره Δt ستعبر الشحنات الموجودة فى الطول $v\Delta t$ خلال مساحة المقطع المستعرض عند P .

ولكننا لا زلنا بحاجة للتعبير عن التيار بدلالة الشحنات المنفردة التى تكونه . وناقل الشحنة يتحرك مسافة معينة فى اتجاه التيار فى زمن مقداره Δt ، فإذا كان متوسط سرعة الناقل هو v ، فإن المسافة التى يتحركها فى زمن مقداره Δt هو $v\Delta t$. وعلى هذا ، ففى فترة زمنية مقدارها Δt ، تكون كل ناقلات الشحنة فى طول مقداره $v\Delta t$ إلى اليسار من النقطة P فى الشكل 12-19 متحركة خلال المقطع المستعرض عند P . وحيث أن حجم هذا المقطع من الطول هو $AV\Delta t$ ، ولأن لدينا n_u من ناقلات الشحنة فى وحدة الحجوم ، يكون عدد ناقلات الشحنة التى تعبر P فى زمن مقداره Δt هو $n_uAv\Delta t$. وكل ناقل يحمل شحنة مقدارها q ولهذا :

$$I = \frac{\text{الشحنة المارة بالنقطة } P \text{ فى زمن مقداره } \Delta t}{\Delta t} = \frac{qn_u Av\Delta t}{\Delta t} = qn_u Av$$

ويمكننا الآن استخدام قيمة I هذه فى التعبير الخاص بالقوة المؤثرة على شحنة واحدة .

$$F = \frac{B_\perp I}{n_u A} = qvB_\perp$$

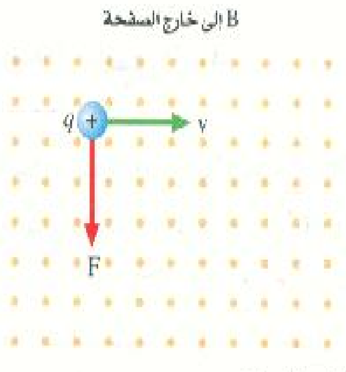
وعلى هذا نستنتج ما يلى :

تتعرض شحنة مقدارها q متحركة بسرعة مقدارها v عموديا على مجال مغناطيسى مقداره $B_\perp$ لقوة مغناطيسية مقدارها

$$F = qv\,B_\perp \qquad (19\text{-}2)$$

ونستطيع استخدام قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه هذه القوة . ونقطة البداية هى تذكر

أن اتجاه التيار يعرف بأنه اتجاه سرعة الشحنات الموجبة المتحركة . وعلى هذا ، إذا أشرنا بأصابع اليد اليمنى فى اتجاه **B** وبالإبهام الأيمن فى اتجاه السرعة **v** ، فإن راحة اليد (الكف) ستدفع فى اتجاه القوة المؤثرة على الشحنة ويمكنك الرجوع إلى الشكل 13-19 كمثال على هذا الموقف حيث نرى شحنة مقدارها q تتحرك بسرعة **v** خلال مجال مغناطيسى **B** يتجه خارجًا من الصفحة . والمتجهان المتقاطعان **B** و **v** يحددان مستوى (الرأسى) ، والقوة **F** المؤثرة على q عمودية على هذا المستوى . وباستخدام قاعدة اليد اليمنى سنجد أن **F** ستكون فى الاتجاه الموضح فى الشكل 13-19 . ويلاحظ أن المعادلة 2-19 تدل على أن اتجاه **F** ينعكس عندما تكون شحنة الجسيم سالبة . بمعنى أنه لو كانت الشحنة فى الشكل 13-19 سالبة ، لكانت القوة **F** متجهة إلى أعلى بدلاً من إلى أسفل .



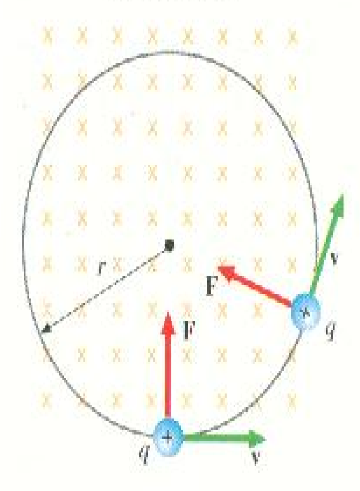
شكل 13-19:
استخدام قاعدة اليد اليمنى لإيجاد اتجاه F المؤثرة على الشحنة .

هناك ملاحظة مهمة فيما يتعلق بحقيقة أن القوة تكون دائمًا متعامدة مع السرعة . وحيث أن متجه السرعة يكون دائمًا ولحظيًا مع اتجاه الحركة ، فإن القوة لن يكون لها مركبة فى اتجاه الحركة مما يعنى أن القوة لن تبذل شغلاً على الشحنة ولن تغير من ثم من طاقة حركتها . وسيكون التأثير الوحيد للقوة هو أن تغير اتجاه حركة الشحنة .

19-7 حركة جسيم فى مجال مغناطيسى (قوة لورنتز)



سنقوم الآن بتتبع حركة جسيم مشحون فى مجال مغناطيسى كما يوضحها الشكل 14-19 . لقد عرفنا لتونا أن السرعة v لن يتغير مقدارها بتأثير القوة (وكل ما سيتغير هو اتجاه السرعة) . فلو افترضنا الآن أن المجال المغناطيسى منتظم (أى أن له نفس الشدة ونفس الاتجاه فى كل مكان) فإن مقدار القوة المغناطيسية $F = qvB$ سيظل ثابتًا . إن عليك أن تثبت أن اتجاه القوة المبين فى الشكل 14-19 هو الاتجاه الصحيح .

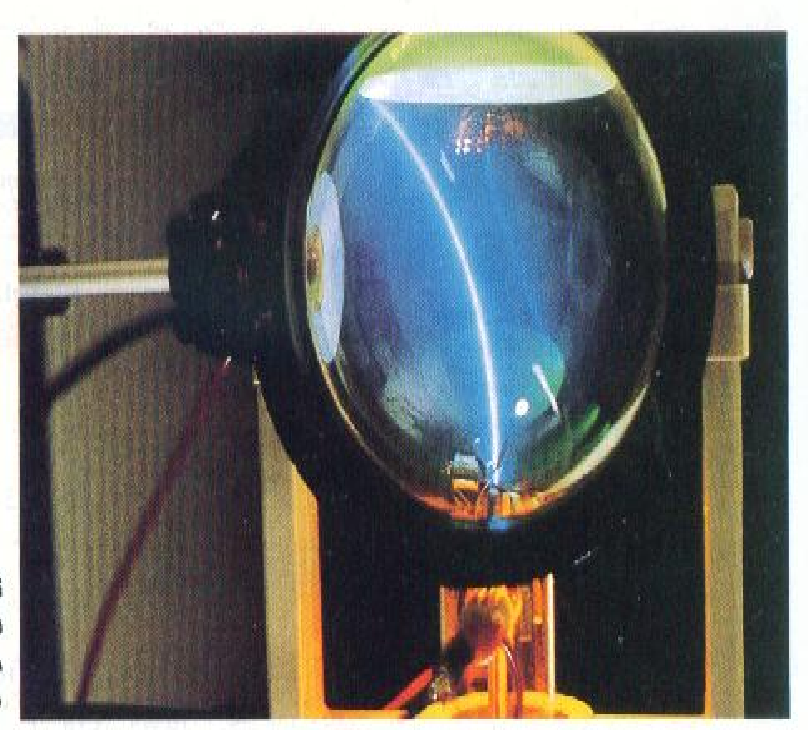


شكل 14-19:
يتبع الجسيم المشحون فى حركته مسارًا دائريًا داخل مجال مغناطيسى منتظم .

لقد جابهنا فى مرات عديدة من قبل موقفًا ديناميكيًا مشابهًا . ومن ذلك حالتان كان فيهما الجسم تحت تأثير قوة ثابتة ومتعامدة باستمرار مع اتجاه الحركة وهما : (1) حالة كرة تتأرجح فى دائرة وهى معلقة فى طرف خيط مثبت و (2) حالة الحركة فى مدارات دائرية تثاقلية . والقوة فى كل من هاتين الحالتين تجعل الجسم يتحرك فى مسار دائرى بسرعة ثابتة المقدار . وتوصف هذه الحركة بدلالة عجلة (تسارع) جذب مركزى هى v^2/r (المعادلة 9-7) حيث r هو نصف قطر الحركة الدائرية . وفى الحالة الراهنة فإن القوة المسئولة عن هذه العجلة (التسارع) هى qvB ، أى القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنة q . ويتيح لنا قانون نيوتن الثانى أن نكتب ما يلى :

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

حيث m هى كتلة الجسيم المشحون . وعلى هذا تدور الشحنة q التى كتلتها m وتتحرك فى مجال مغناطيسى منتظم **B** يتجه عموديًا على سرعة الشحنة **v** ، فى دائرة نصف قطرها :



تنحنى حزمة من الإلكترونات علـى هيئـة دائرة عندما تنتقل خلال منطقة بها مجــال مغناطيسى خارجى . هل يمكنك تحديد اتجاه المجال المغناطيسى فى هذه الصورة ؟

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (19\text{-}3)$$

فإذا كانت الشحنة فى الشكل 14-19 سالبة فإن اتجاه القوة سينعكس وبذلك تدور الشحنة السالبة فى دائرة فى اتجاه حركة عقارب الساعة .

هناك فرق مهم جدًا ، على المرء تذكره ، بين القوة الكهربية والقوى المغناطيسية المؤثرة على الشحنات ، ويمكن صياغة هذا الفرق كما يلى :

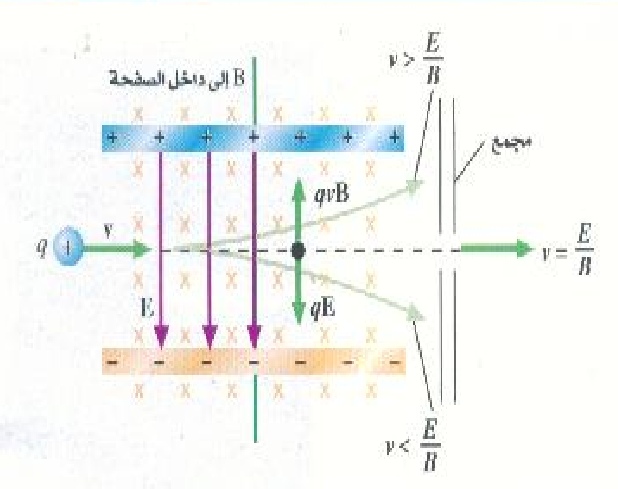
تكون القوة الكهربية qE فى اتجاه $\mathbf{E}$ (أو فى عكس اتجاه $\mathbf{E}$ بالنسبة للشحنات السالبة) ، أما القوة المغناطيسية qvB فتكون متعامدة مع $\mathbf{B}$. ولـهذا فإن المجـالات الكهربيـة E قادرة على بذل شغل على الشحنات بينما لا يقدر على ذلك المجال المغناطيسى B .

19-8 تطبيقات على القوى المغناطيسية المؤثرة على الشحنات

إن خواص الجسيمات التى تتكون منها الذرات والجزيئـات ، يمكن دراستها عند ملاحظة سلوكها فى وجود مجـالات E ومجالات B . وتحمل هذه الكيانـات الدقيقة للغاية من المادة شحنات تتراوح قيمتها بين شحنة إلكترونية واحدة e أو قدر ذلك عدة مرات . وسنستعرض بإيجاز ثلاثة من هذه التطبيقات .

جهاز انتقاء السرعات

يوضح الشكل 15-19 زوجًا من الألواح المشحونة المتوازية ، المغمـورة فى مجال مغناطيسى يتجه إلى داخل الصفحة . وكما مر علينا عدة مرات من قبل فإن اللوحين المتوازيين يخلقان مجالاً كهربيًا منتظمًا فيما بينهما ويتجه من اللوح الموجب إلى اللوح السالب .



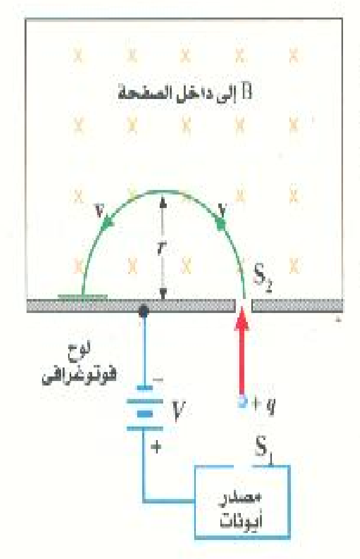
شكل 15-19:
يقوم جهاز انتقاء السرعات بإمرار جسيمات دون أى انحراف لأنها تحقق شرط تساوى القوة الكهربية qE والقوة المغناطيسية qvB المؤثرتين عليها .

ويسمى هذا الجهاز باسم جهاز **انتقاء ذى مجالين متعامدين** وذلك بسبب اتجاه كل من المجال المغناطيسى والمجال الكهربى . ويحفظ الجهاز فى غرفة تفريغ بحيث تكون مقاومة الهواء مهملة .

افترض الآن أن جسيمًا مشحونًا $(+q)$ يدخل إلى المنطقة التى يتعامد فيها المجالان بسرعة **v** موزاية للوحين ، كما هو مبين فى الشكل 15-19 . ولابد أنك تستطيع إثبات أن القوة الكهربية والقوة المغناطيسية متعاكستان فى الاتجاه كما يوضح الرسم . ولهذا فإن الجسيم سوف ينحرف بشكل عام إما إلى أعلى أو إلى أسفل اعتمادًا على أى من القوتين أكبر من الأخرى .

وستمر الشحنة خلال منطقة التعامد بدون انحراف ، فقط إذا تساوت القوتان المتعاكستان . ويتطلب هذا الشرط أن :

$$qE = qvB \qquad \text{أو} \qquad v = \frac{E}{B}$$



شكل 16-19:
جهاز مطياف الكتلة . ويمكن تعيين كتلة أيون ما بمعرفة الموقع الذى يضرب فيه الأيون لوحًا فوتوغرافيًا .

والجسيمات التى تتحرك بهذه السرعة تمامًا سوف تمر من خلال فتحة صغيرة تقع على خط واحد مع المحور المركزى للجهاز ، أما الجسيمات التى تتحرك بأية سرعات أخرى غير هذه السرعة فإنها ستمنع من المرور . وهكذا فإن هذا الجهاز يتيح لنا - إذا ضبطنا قيم E و B - أن ننتقى جسيمات تتمتع كلها بنفس مقدار السرعة من بين حزمة الجسيمات التى لها سرعات مختلفة . ولابد أنك قادر على إقناع نفسك بأن النتيجة نفسها تطبق على الشحنات السالبة . كما أنك لابد أن ستستغرق بعض الوقت لتثبت أن وحدات SI الخاصة بالنسبة E/B هى بالفعل متر لكل ثانية (m/s) .

مطياف الكتلة

لقد ناقشنا فى الفصل الثانى الكتل الماكروسكوبية (الكبيرة) وعرفناها منسوبة إلى الكيلو جرام العيارى الدولى . على أن أكثر قياسات الكتلة دقة هى الخاصة بذرات العناصر المختلفة . وهناك جهاز يعرف باسم **مطياف الكتلة** وتستخدم فيه القوة المغناطيسية المؤثرة على ذرات مشحونة (أو أيونات) لقياس الكتل إلى دقة تصل إلى سبعة أو ثمانية أرقام عشرية معنوية . ويبين الشكل 16-19 رسمًا تخطيطيًا لهذا الجهاز حيث يرى مصدر

للأيونات محفوظ داخل غرفة مفرغة ، كما تـرى منطقة بـها مجـال مغناطيسـى منتظم وجهد كهربى بين مصدر الأيونات ومنطقة المجال المغناطيسى . ويبدأ العمل بـأن تتـأين ذرات غاز بواسطة قذفها بالإلكترونات ثم تخرج الأيونات من فتحة مصدر الأيونات S_1 . ثم تعجِّل الأيونات نحو مدخل الفتحة S_2 بواسـطة جـهد معلـوم V . أى أن الأيونـات تدخل المجال المغناطيسى ولـها طاقة حركة تعطى من المعادلة 3-17 وهى :

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = qV \tag{19-4}$$

وقد تكون الشحنة q مساوية $+e$ أو $+2e$ ، إلخ اعتمادًا على درجة تأين الـذرات وكثـيرًا ما يحدث أن تستخدم ذرات منفردة التأين (أى أيونات وحيدة الشحنة) .

وبمجرد أن تدخل الأيونات إلى منطقة المجال المغناطيسـى ، فإنـها تتحـرك بسـرعة ذات مقدار ثابت ثم تـدور بواسطة القوة المغناطيسـية فـى دائـرة نصف قطرهـا معـرّف بالمعادلة 3-19 : $r = mv/qB$. وبحركتها فى نصف دائـرة ، فـإن الأيونـات تصطـدم بكشاف كلوح فوتوغرافى مثلاً يقع على مسافة $2r$ من الفتحة S_2 . وبحل المعادلة 4-19 لإيجاد v ثم التعويض بها فى المعادلة 3-19 ، نستطيع الحصـول علـى معادلـة تحديد كتلة الأيون . وسنبدأ أولاً بالحصول على $v^2 = 2qV/m$. ثم

$$r^2 = \frac{m^2v^2}{q^2B^2} = \frac{m^2\left(\frac{2qV}{m}\right)}{q^2B^2}$$

وهذا يؤدى بدوره إلى العلاقة :

$$m = \frac{qB^2r^2}{2V} \tag{19-5}$$

وحيث أن الكميات q ، V ، B معروفة ، فإن القياسات الدقيقة للمسافة $2r$ ستتيح لنا تعيين كتلة الأيونات . ومن الاستخدامات ذات الأهمية الخاصة لمطياف الكتلة ، قيـاس الفرق بين كتل النظائر المختلفة لنفس العنصر .

مثال 19-1

فـى مطياف الكتلة الموضح فى الشكل 16-19 تُعجَّل ذرات منفردة التأين لعنصر من العناصر ، خلال فـرق للجـهد مقداره 1.000 kV ثـم تدخـل مجـالاً مغناطيسـيًا شدتـه 1.950 T . وقد لوحظ أن الأيونات تضرب حاجزًا يبعد مسافة مقدارها 2.088 cm عن S_2 . ما هى كتلة هذه الأيونات وما هـو النظير الـذى تمثلـه هـذه الأيونـات ؟ استخدم المعلومات الخاصة بكتل النظائر فى الملحق رقم 2 .

استدلال منطقى :

1

سؤال : كيف يمكن تحويل المعلومات المعطاة إلى الكميـات المذكـورة فـى معادلـة الكتلـة

الواردة فى المعادلة 5-19 ؟

الإجابة : إن لديك $V = 1.000$ kV و $B = 1.950\ T$. والمسافة من S_2 هى ضعف نصف القطر r ولذا يكون $r = 1,044$ cm . والأيونات وحيدة الشحنة تحمل شحنة مقدارها $q = e = 1.602 \times 10^{-19}$ C .

سؤال : وكيف أتمكن من الحصول على الكتلة النظائرية من هذا ؟

الإجابة : الكتل النظائرية مدرجة فى الملحق رقم 2 بدلالة وحدة الكتل الذرية (u) وهى تعرَّف بأنها جزء من اثنى عشر جزءًا من كتلة نظير الكربون 12 :

$$1\ \text{u} = 1.6606 \times 10^{-27}\ \text{kg}$$

وستعطيك المعادلة 5-19 الكتلة بالكيلو جرامات وعليك بعد ذلك تحويلها .

الحل والمناقشة : كتلة أيون واحد هى :

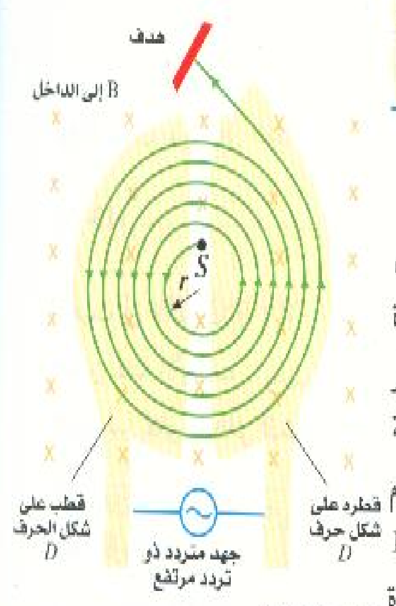
$$m = \frac{(1.602\times10^{-19}\ \text{C})(1.950\ \text{T})^2(1.044\times10^{-2}\ \text{m})^2}{2(1.000\times10^3\ \text{V})} = 3.320 \times 10^{-26}\ \text{kg}$$

ويبين الملحق رقم 2 أن كتلة ^{20}Ne هى 19.992440 u .

تمرين : احسب مدى التباعد بين أيونى ^{22}Ne و ^{20}Ne عندما يصطدمان بالكشاف (اللوح الفوتوغرافى) . **الإجابة : بالنسبة للنظير ^{22}Ne فإن $r = 1.095$ cm ، ومن ثم فإن التباعد بين الأيونين يكون 2(1.095 - 1.044) cm أو 0.102 cm . ودقة مطاييف الكتلة من الكفاءة بحيث تسمح بقياس مسافات كهذه بسهولة .**

السيكلوترون

إن كثيرًا مما نعرفه عن تركيب النواة الذرية قد تحقق عن طريق قذف هذه النوى بأيونات أو إلكترونات أو بروتونات ذات طاقات عالية جدًا . وعندما « نشق » نواة بمثل هذه القذائف فإننا نحصل بذلك على بعض تفاصيل تركيبها الداخلى . ويعتبر **السيكلوترون** واحدًا من الأجهزة المبكرة المستخدمة للحصول على طاقات عالية للغاية للجسيمات ، وذلك باستخدام مجالات مغناطيسية للتحكم فى مساراتها . وقد تم صنع هذا الجهاز على يدى إ . أ . لورانس فى جامعة كاليفورنيا ، بيركلى عام 1930 وقد بلغ من أهمية السيكلوترون كأداة فعالة فى البحوث ، أن مُنح لورانس جائزة نوبل فى الفيزياء عام 1930 .



شكل 17-19: تخطيط بيانى للسيكلوترون . تتسارع البروتونات (تُعجَّل) بواسطة المجال الكهربى الموجود بين القطبين ، وتحتفظ بحركتها فى دائرة بفضل المجال المغناطيسى القوى . وتظل البروتونات تدور فى حلزون نحو الخارج ، متحركة بسرعات أكبر فأكبر كلما زاد نصف قطر المدار ، حتى تتصادم فى النهاية مع هدف مثبت خارج السيكلوترون .

ويوضح الشكل 17-19 العناصر الأساسية للسيكلوترون ، وكما هو الحال فى مطياف الكتلة فإن هناك مجالاً مغناطيسيًا متعامدًا مع المنطقة التى تتحرك فيها الجسيمات المشحونة . وتتحرك الجسيمات فى مسارات دائرية فى غرفة مفرغة داخل قطبين على شكل D (لذا يسميان باسمه) وتفصلهما فجوة صغيرة . وفى تجربة نموذجية ، تنطلق البروتونات من المصدر S بالقرب من مركز الفجوة الواقعة بين القطبين . ومثلما يحدث فى مطياف الكتلة ، فإن فرقًا للجهد بين القطبين يقوم بتعجيل البروتونات نحو أحد

القطبين . وبمجرد دخول البروتون إلى داخل القطب « دى » فإنه « يبحر » فى دائرة ويخرج من القطب فى نفس اللحظة تمامًا التى ينعكس فيها الجهد فيتعرض البروتون للتعجيل (التسارع) من جديد ، فيدخل إلى القطب (الدى) المقابل بسرعة أكبر ، ويدور فى دائرة أكبر . ويتكرر هذا المشهد مرات ومرات وفى كل مرة يُعجّل البروتون إلى سرعات أكبر فأكبر وفى النهاية تُحرف البروتونات عند محيط السيكلوترون على هيئة حزمة ذات طاقة عالية مسدّدة نحو هدف محدد .

ويكمن حجر الزاوية فى هذا الجهاز فى حقيقة أن الزمن الذى يستغرقه جسيم مشحون ليدور مرة واحدة فى مساره الدائرة لا يعتمد لا على سرعة الجسيم ولا على نصف قطر المسار . ومن السهل إثبات ذلك ، فالزمن الدورى T هو

$$T = \frac{\text{المسافة}}{\text{مقدار السرعة}} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m v}{qBv} = \frac{2\pi m}{qB}$$

أما التردد f الذى هو $1/T$ ،

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$



صنع إ. أ. لورانس هذا السيكلوترون الأصلى عام 1932.

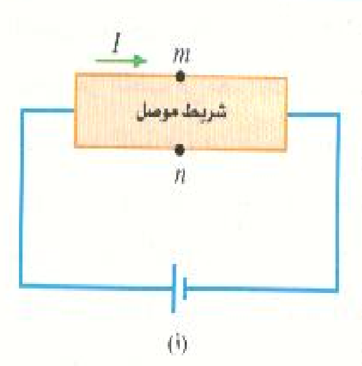
فإذا تم عكس قطبية الجهد المطبق على القطبين بتردد يساوى نصف هذا المقدار فإنه يتوافق مع وصول البروتون إلى الفجوة ، بغض النظر عن مدى السرعة التى يتحرك بها البروتون أو مدى كبر نصف قطر مساره . وهكذا يتم تعجيل البروتون مرات كثيرة قبل أن يغادر السيكلوترون وهو مكتسب لطاقات عالية جدًا .

19-9 أثر هول

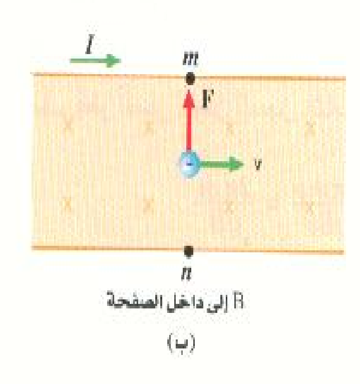
هناك عدد قليل من الظواهر الكهربية التى تشير بوضوح إلى إشارة ناقلات الشحنة . ويمكن تفسير معظم التجارب بالنسبة لشحنات موجبة تتدفق فى اتجاه ما ـ وبنفس الدرجة بالنسبة لشحنات سالبة تتدفق فى الاتجاه المضاد . أما التجربة التى سنصفها هنا فهى واحدة من تجارب قليلة يتم فيها التمييز بين ناقلات الشحنة الموجبة والسالبة .

وسنعتبر الآن الدائرة المبينة فى الشكل 18-19 (أ) حيث تتصل بطارية بطرفى شريط منتظم موصل ورقيق ومصنوع ربما من فلز . وتقع النقطتان المتماثلتان m و n عند نفس الجهد ولذلك لا يوجد بينهما فرق جهد ، وعندما يطبق مجال مغناطيسى عموديًا على الوجه العريض للشريط ـ كما فى (ب) ، فإن النقطتين m ، n تصبحان عند جهدين مختلفين . وسنبحث الآن فى كيفية تكون فرق الجهد هذا .

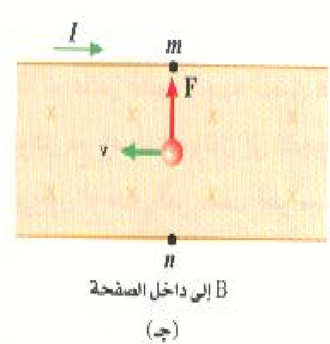
سنفترض أن الشحنات المتدفقة خلال الشريط موجبة . وترى إحدى هذه الشحنات فى الشكل 18-19 (ب) . ونحن نعلم من قاعدة اليد اليمنى أن الشحنة ستجبر على الحركة إلى أعلى نحو m ، ومن ثم تصبح النقطة m موجبة ويظهر فرق للجهد بين النقطتين m و n . ونكرر القول بأن النقطة m تكون موجبة عندما تكون ناقلات الشحنة موجبة .



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 18–19:
أثر هول . هل تستطيع إثبات أن الجهد بين m و n تنعكس إشارته إذا كانت الشحنات سالبة بدلاً من موجبة ؟ (تذكر أن قاعدة اليد اليمنى تحدد القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة موجبة . أما القوة المؤثرة على شحنة سالبة فتكون في الاتجاه المضاد) .

وسنفترض الآن ـ كبديل ـ أن التيار مكون من شحنات سالبة متحركة نحو اليسار ، كما في الشكل 18–19 (جـ) . ومرة أخرى تفيدنا قاعدة اليد اليمنى أن هناك قوة إلى أسفل تؤثر على الشحنات الموجبة المتحركة نحو اليسار . على أننا نتعامل الآن مع شحنات سالبة ، ولذا تتعرض هذه الشحنات إلى قوة متجهة إلى أعلى نحو m . أى أن النقطة m فى هذه الحالة ستصبح **سالبة الشحنة** .

إن لدينا هنا ، الآن ، طريقة حاسمة لتعيين إشارة ناقلات الشحنة فى المادة . وقد اكتشف هذا الأثر العالم الفيزيائى الأمريكى إدوين هول عام 1879 وسمى من وقتها باسمه وصار **أثر هول** . ويستطيع علماء العصر الحالى ـ باستخدام هذا الأثر ـ أن يتعرفوا على إشارة ناقلات الشحنة فى المواد الإلكترونية المحضرة حديثًا لكى تستغل فى مجال إلكترونيات الحالة الصلبة . ويشكل أثر هول أيضًا الأساس فى أداة تنتج على نطاق تجارى لقياس المجالات المغناطيسية .

ويمكن أن يستخدم أثر هول لتعيين السرعة المتوسطة لناقلات الشحنة داخل موصل ما . وتسمى هذه السرعة المتوسطة **بسرعة الانسياق** نتيجة استجابة الشحنات للجهد المطبق . ولكى ندرك كيفية تعيين هذه السرعة فسنعتبر ما يحدث عندما تتراكم الشحنات (+ أو −) على الجانب m ، بينما يصبح الجانب المقابل n فى حالة نقص من هذه الشحنات وبهذا يتكون مجال كهربى ومن ثم فرق للجهد بين الجانبين m و n . وهذا الجهد المستعرض هو ما يعرف **بجهد هول** ، V_H . وتتحدد قيمته بالتوازن القائم بين القوى المغناطيسية والقوى الكهربى المؤثرة على ناقلات الشحنة :

$$qE_H = q\left(\frac{V_H}{d}\right) = qvB$$

وهو ما يؤدى إلى :

$$V_H = vBd$$

حيث v هى سرعة انسياق الشحنات و d هو عرض الشريط فإذا كانت قيم B ، d ، V_H معروفة من القياسات فإن v يمكن تعيينها .

19-10 القوى بين تيارين متوازيين ، الأمبير

سنقوم الآن بمراجعة سريعة للمبادئ الأساسية للمغناطيسية ؛ وهو ما درسناه حتى الآن . لقد حددنا اتجاه المجال المغناطيسى بدلالة سلوك البوصلة . وعرفنا أيضًا أن سلكًا حاملاً للتيار يتعرض لقوة مغناطيسية إذا وضع فى مجال مغناطيسى . وبالإضافة إلى ذلك ؛ عرفنا أن التيار يعتبر مصدرًا للمجال المغناطيسى ، نظرًا لتأثير البوصلة عند وضعها بالقرب من تيار كهربى .

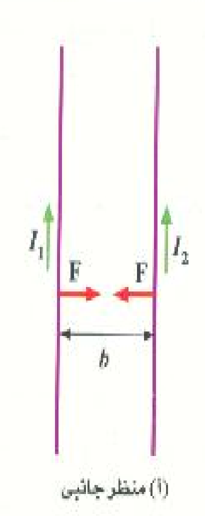
من المنطقى إذن ، أنه عند وجود تيارين متجاورين فإن كلاً منهما ينشئ مجالاً مغناطيسيًا يؤثر بقوة على الآخر . وقد أثبتت تجارب أروستيد وعالم الفيزياء والرياضيات

الفرنسى أندريه مارى أمبير فى بداية القرن الثامن عشر صحة هذا الأمر . وسنستخدم هذه الحقيقة الخاصة بالتفاعل الأساسى بين التيارات لكى نُعرِّف وحد التيار (الأمبير) .

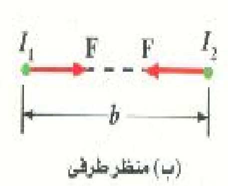
سنفترض أن لدينا سلكين طويلين مستقيمين يحملان تيارين I_1 ، I_2 متوازيين كما يوضح الشكل 19-19 . وتفصل بين السلكين مسافة مقدارها b . لقد ثبت أن هناك قوة تجاذب يؤثر بها كل من التيارين على الآخر . ومقدار هذه القوة منسوبًا إلى وحدة الأطوال يتناسب مع حاصل ضرب التيارين طرديًا ومع المسافة b بينهما عكسيًا :

$$\frac{F}{L} = \frac{kI_1I_2}{b} \qquad (19-6)$$

حيث k ثابت التناسب .



(أ) منظر جانبى



(ب) منظر طرفى

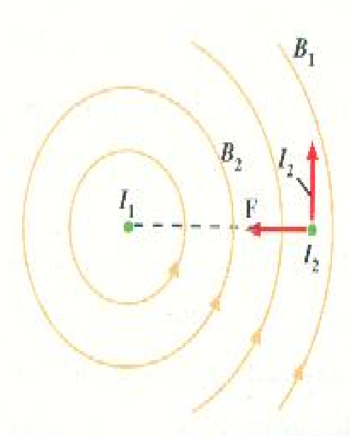
شكل 19-19:
يتجاذب التياران المتوازيان . فى (ب) تمثل النقط الخضراء التيار خارجًا نحو القارئ . ما الذى يحدث لو أن التيارين متوازيان ومتضادان ؟

وإذا طبقنا قاعدة اليد اليمنى على الشكل 19-20 فسنرى أن القوة المؤثرة على I_2 تتجه نحو I_1 (أى أنها قوة تجاذب) ؛ فالمجال الناشئ عن I_1 يتجه إلى داخل الصفحة عند موقع I_2 . فإذا كان إبهام اليد اليمنى يشير إلى اعلى نحو قمة الصفحة ، وتتجه أصابع اليد اليمنى إلى داخل الصفحة فإن راحة اليد ستقوم بالدفع ناحية I_1 . وحسب نص قانون نيوتن الثالث فإن التيار I_2 لابد أن يؤثر بقوة مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه على التيار I_1 . ويمكن إثبات ذلك بنفس الطريقة السابقة إذا حددنا المجال المغناطيسى للتيار I_2 عند موقع I_1 ثم تطبيق قاعدة اليد اليمنى هناك .

وفى الحالة الخاصة لتيارين متساويين $I_1 = I_2 = I$ فإننا نستطيع أن نصل إلى تعريف لوحدة التيار ، ومن ثم تعيين قيمة ثابت التناسب k :

عندما يوضع تياران متساويان ومتوازيان وشدة كل منهما أمبير واحد (A) فإن كلاً منهما يؤثر على الآخر بقوة مقدارها 2×10^{-7} N لكل متر من طولهما إذا كانت المسافة بينهما مقدارها متر واحد .

وقد يبدو هذا التعريف اختياريًا وهو بالفعل كذلك . وكما درسنا فى الفصل الأول فإن بعض الكميات التى نقيسها فى الفيزياء تعتبر أساسية لجميع الكميات الأخرى ولابد من تعريف وحداتها بطريقة اختيارية . ووحدة الأمبير من تلك الوحدات . (ومن الوحدات الأخرى التى التقينا بها الكتلة والطول والزمن ودرجة الحرارة) .



شكل 19-20:
يخلق التيار I_1 مجالاً مغناطيسيًا B_1 يؤثر بقوة F على I_2 . هل يمكنك إثبات أن المجال B_2 الناشئ عن I_2 يؤثر بقوة مساوية ومضادة على I_1 ؟ (هذا مثال آخر على قانون نيوتن الثالث) .

على الرغم من أننا تعرفنا على وحدة الكولوم للشحنة من قبل أن نبدأ دراستنا للتيار الكهربى ، إلا إننا سنستعمل تعريف الأمبير الذى وصلنا إليه منذ قليل فى تعريف الكولوم .

كولوم واحد يساوى حاصل ضرب 1 أمبير × 1 ثانية (1 C = 1 A.s) .

سنتعرف الآن على ما يقدمه هذا التعريف فيما يتعلق بقيمة ثابت التناسب فى المعادلة 19-6 ، التى تعطينا عند حلها للحصول على k :

$$k = \frac{Fb}{I_1I_2L}$$

ومنها يتضح أن وحدات SI للمقدار k هى

$$\frac{N.m}{A^2.m} = \frac{N}{A^2}$$

وباستخدام هذه الوحدات والتعريف السابق للأمبير لابد أن يكون لدينا :

$$k = \frac{(2\times10^{-7})(1m)}{(1A)(1A)(1m)} = 2\times10^{-7}\ N/A^2 \qquad (19\text{-}7)$$

وعلى الرغم مما قد يبدو غريبًا وأخرقًا ، إلا أن الثابت k يكتب عادة على هيئــة $\mu_0/2\pi$ ، حيث المقدار μ_0 هو ثابت فيزيائى كونى آخر يسمى **إنفاذية الفراغ** وقيمــة هـذا الثـابت μ_0 طبقًا لـهذا التعريف هى :

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ N/A^2$$

وتصبح المعادلة 6–19 مع استعمال هذا الرمز الجديد

$$\frac{F(2 \text{ على } 1)}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} \qquad (19\text{-}8)$$

وفى النهاية ، ماذا يحدث لو أننا عكسنا اتجاه أحـد التيـارين ليصبحا متوازيـين ومتضادين ؟ لابد أنه لن يكون مستغربًا أن القوى المؤثرة على كلٍ من التيـارين سـتنعكس هى الأخرى فتصبح متنافرة .

مثال 2-19 :

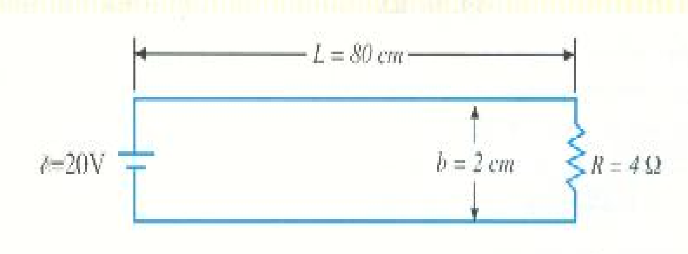
فى الشكـل 21–19 ، تتصـل بطاريـة قوتـها 20 V بجـهاز كـهربائى بواسطة سلكين متوازيين طولـهما 80 cm ويفصل بينهما مسافة مقدارها 2 cm . وللجهاز مقاومة مقدارها 4 Ω بينما مقاومة جميع أسلاك التوصيل مهملة بالمقاومة بـهذا . احسـب القوة المغناطيسية التى يوثر بها كل من السلكين على الآخر . وهل هذه القوة تجاذبية أم تنافرية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : على أى شيء تعتمد القوة المغناطيسية ؟

الإجابة : تدلنا المعادلة 6–19 على أن القوة لوحدة الأطوال تتناسب طرديًا مـع حـاصل ضرب التيارين المارين فى السلك وعكسيًا مع المسافة بينهما .

سؤال : ما الذى يحدد ما إذا كانت القوة تجاذبية أو تنافرية ؟



شكل 21–19:
احسب القوة المؤثرة بين السلكين الطويلين فى الدائرة .

الإجابة : إنها تجاذبية إذا كان التياران فى نفس الاتجاه وتنافرية لو كانا متعاكسين .

سؤال : وإلى أى الحالتين تنتمى هذه المسألة ؟

الإجابة : تدور الشحنة فى دائرة كهربية مغلقة ولهذا يكون التيار المار فى السلكين هو نفس التيار من حيث المقدار ومتعاكس الاتجاه .

سؤال : ما الذى يحدد مقدار التيار ؟

الإجابة : إنه قانون أوم : $I = V/R$ ، حيث $V = 20\ \text{V}$ و $R = 4\ \Omega$.

سؤال : ما هى المعادلة الرياضية الدقيقة لحساب القوة ؟

الإجابة : تدل المعادلة 8-19 على أن $F = \dfrac{\mu_0 I^2 L}{2\pi b}$. وقيمتا L و b معلومتان .

الحل والمناقشة : أولاً لابد من ملاحظة أن القوتين المؤثرتين على السلكين متنافرتان ، أما التيار فهو

$$I = V/R = 20\ \text{V}/4 = 5\ \text{A}$$

والقوة المؤثرة على كل من السلكين هى

$$F = \frac{(2 \times 10^{-7}\ \text{N/A}^2)(5\ \text{A})^2(0.80\ \text{m})}{0.02\ \text{m}} = 2.00 \times 10^{-4}\ \text{N}$$

إن الثابت μ_0 صغير جدًا ولهذا فإن القوة المغناطيسية بين التيارين تكون صغيرة جدًا ما لم يكن التياران كبيرين للغاية ، أو أن المسافة بينهما صغيرة جدًا .

19-11 المجالات المغناطيسية الناتجة عن تيارات كهربية

لم نفعل إلى الآن سوى النص دون برهان ـ على أن التيارات الكهربية تخلق مجالات مغناطيسية ، وفحصنا حالة واحدة كان فيها تياران يؤثران بقوة على بعضهما البعض . وعلينا الآن أن نحدد بدقة تلك المجالات المغناطيسية التى تخلقها تشكيلات مختلفة من التيارات . وستكون نتائج القسم السابق هى البداية ؛ لإيجاد المجال المغناطيسى الناشئ عن تيار يمر فى سلك مستقيم طويل .

وقد أصبحنا نعرف من سلوك إبرة البوصلة أن المجال المغناطيسى الذى يخلقه تيار يمر فى سلك مستقيم يكون على شكل حلقات متحدة المركز حول السلك (الأشكال 5-19 و 6-19) . وعلى هذا يكون المجال B_1 نتيجة التيار I_1 المبين فى الشكل 19-19 هو الذى توضحه الدوائر فى الشكل 20-19 .

ونستطيع أيضًا أن نستعمل المعادلة 1-19 لكى نكتب معادلة القوة التى يؤثر بها B_1 على I_1 بالنسبة للموقف المبين فى الشكل 20-19 .

$$F\,(\text{المؤثرة على } I_2) = (B_1)_\perp I_1 L$$

حيث $(B_1)_\perp$ هى مركبة المجال المغناطيسى العمودية على I_2 **فى موقع** I_2 . ويلاحظ فى

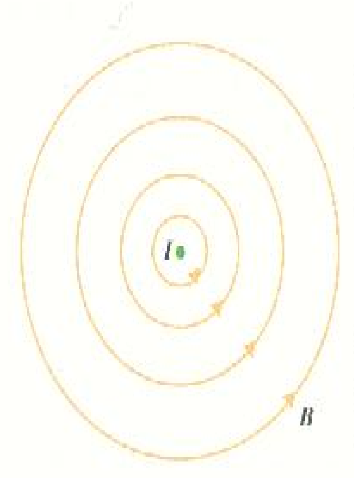
الشكل 20-19 أن B_2 متعامد مع I_2 ولهذا يكون $(B_1)_\perp = B_1$.

دعنا الآن نستخدم النتائج التجريبية للقسم السابق :

$$F\,(I_2 \text{ المؤثرة على }) = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi b}$$

وبمقارنة هذين التعبيرين فإننا نحصل مباشرة على صيغة لشدة المجال المغناطيسي الناشئ عن سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا I :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad \text{(السلك طويل مستقيم يحمل تيارًا)} \qquad (19\text{–}9)$$



شكل 22-19:
المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار مستقيم طويل .

يلاحظ هنا أننا أسقطنا الأرقام السفلية على كل من B_1 و I_1 وعممنا مسافة التباعد b لتصبح أية مسافة r من التيار I . والمجال المغناطيسي الدائرى لتيار طويل مستقيم مبين بالشكل 22-19 . ويلاحظ أن خطوط المجال تصبح أكثر تباعدًا كلما زادت المسافة بعيدًا عن I مما يشير إلى أن B يتناقص مع زيادة r (المعادلة 9-19) .

وحساب المجالات المغناطيسية التى تخلقها تشكيلات أخرى للتيارات ، أكثر تعقيدًا عن الذى أوردنا منذ قليل ، ويتطلب معرفة بطرق التفاضل والتكامل . وقد تمكن أمبير من ابتكار أسلوب رياضى لمعالجة الحالة العامة للعلاقة بين أية تيارات والمجالات التى تخلقها تلك التيارات . ويعرف هذا الأسلوب **بقانون أمبير** . على أن هذا القانون يقع خارج نطاق المستوى الرياضى لهذا الكتاب ولذا نورد ـ ببساطة ـ النتائج بالنسبة لعدد قليل من الحالات البسيطة والمفيدة .

حلقة دائرية من السلك

سنفترض أن لدينا حلقة دائرية من السلك ، تحمل تيارًا I كما يوضح الشكل 23-19 (أ) ويوضح خطوط المجال بتفصيل أكبر فى الجزء (ب) من الشكل . فإذا كان نصف قطر الحلقة a ، يكون مقدار المجال عند مركز الحلقة هو

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a} \qquad (19\text{–}10)$$

وعليك تذكر أن هذه المعادلة لا تنطبق إلا على نقطة وحيدة عند مركز الحلقة . أما الملف الذى يحتوى على عدد N حلقة متراصة بإحكام إلى بعضها البعض فى مستوى ، فإنه ينتج عند مركزه مجالاً أكبر من المذكور فى (10-19) N مرة .

الملفات اللولبية

يمكننا عمل ملف لولبى لو أننا قمنا بلف السلك على شكل حلزونى ليصبح كالياى والملف الموضح فى الشكل 4-19 ، ذو لفات متباعدة ومفككة أكثر من المعتاد . ففى العادة يتم لف الملف اللولبى بحيث تتلامس اللفات المتجاورة . وعند مقارنة ما جاء فى

الشكل 24-19 بالمجال الناشئ عن حلقة منفردة في الشكل 23-19 (ب) فإننا نكتشف أن مجالات اللفات المتجاورة تجمع كلها معًا لتكوّن المجال النهائي . ويبين الجزء (ب) من الشكل مقطعًا مستعرضًا في جزء من ملف لولبي محكم اللف . وكما يدل الشكل فإن المجال المغناطيسي بداخل الملف يكون منتظمًا تقريبًا . وهكذا فإن مقدار المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي مجوف ويحمل تيارًا I ، ويتكون من n حلقة من السلك في كل متر من طوله هو :

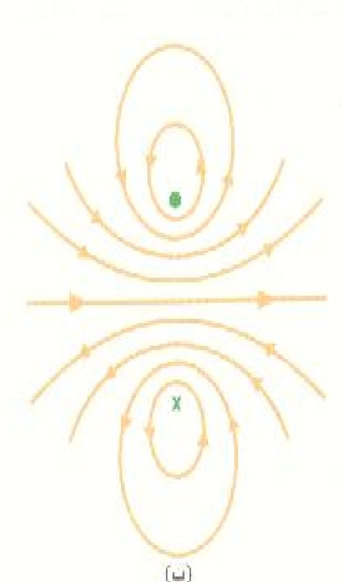
$$B = \mu_0 n I \tag{19-11}$$

وتنطبق هذه العلاقة داخل الملف بأكمله فيما عدا بالقرب من طرفيه . ويستعمل الملف اللولبي دائمًا لخلق مجال مغناطيسي يكون منتظمًا تقريبًا . ويلاحظ أن مقدار B لا يعتمد على قطر أو طول الملف اللولبي . وعلينا - دائمًا - تذكر أن n هو عدد اللفات في كل متر من طول الملف . فإذا كان N هو العدد الكلي للفات و L هو طول الملف اللولبي فإن $n = N/L$ ويمكن عندئذ كتابة المعادلة 11-19 بالصورة البديلة التالية :

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$

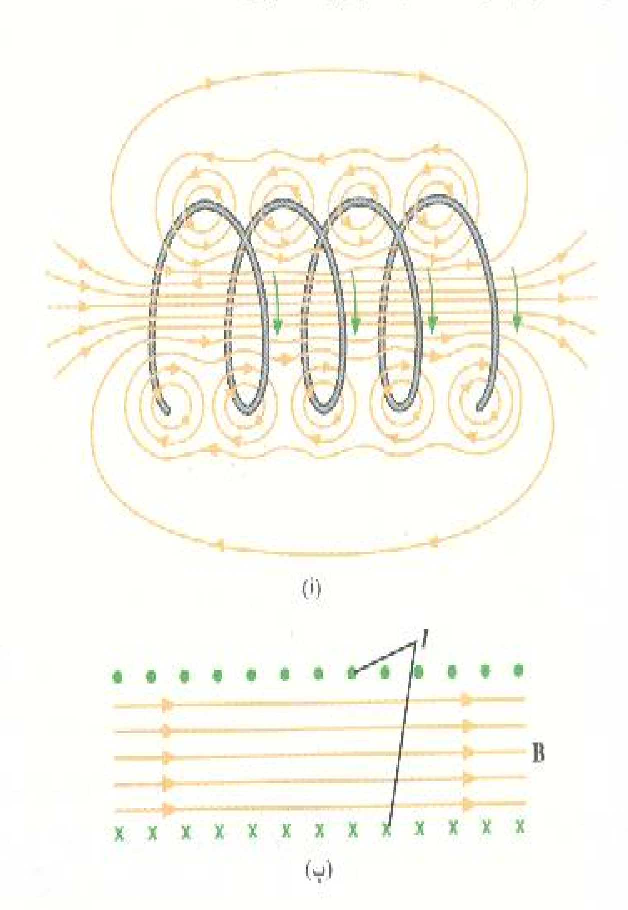
وتستخدم الملفات اللولبية الملفوفة على قلوب من حديد في المغناطيسيات الكهربائية لأجراس الأبواب والعديد من الأجهزة الأخرى .

(أ)



(ب)

شكل 23-19:
منظران للمجال المغناطيسي المتكون حول حلقة تحمل تيارًا . (أ) رسم منظور . (ب) مقطع مستعرض للحلقة الموضحة في الجزء (أ) وبها خطوط المجال .



شكل 24-19:
(أ) رسم منظور لملف لولبي ملفوف بدون إحكام . (ب) منظر لمقطع مستعرض في ملف به عدد كبير من حلقات السلك . وبعيدًا عن طرفي الملف اللولبي فإن المجال يكون منتظمًا بالضرورة بداخله .

مثال توضيحى 3-19

قارن بين شدة المجالات المغناطيسية فى الحالات الثلاث التالية :

1 عند مركز ملف استوائى نصف قطره $r = 2$ cm وبه 100 لفة . وكان التيار المار 5 A .

2 عند مركز ملف لولبى به 100 لفة ونصف قطره $r = 2$ cm وطوله $L = 5$ cm والتيار 5 A .

3 عند نقطة تبعد مسافة مقدارها 2 cm من سلك مستقيم طويل . التيار هو 500 A .

عندما يتدفق تيار خلال لفات هذا الملف اللولبى ، فإن المجال المغناطيسى الناشئ يجذب القلب المصنوع من الصلب إلى داخل الملف اللولبى . وتستخدم هذه الملفات اللولبية على نطاق واسع فى نبيطات الفتح والإغلاق .

استدلال منطقى : ستكون معادلات الحالات الثلاث على النحو التالى :

1 $B = \dfrac{N\mu_0 I}{2r}$ حيث $N = 100$

2 $B = \dfrac{\mu_0 NI}{L}$ تقريبا

3 $B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}$

وبالتعويض عن المقادير التى بهذه المعادلات فإن :

1 $B = \dfrac{(100)(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(5\ \text{A})}{2(0.02\ \text{m})} = 1.57\times10^{-2}\ \text{T}$

2 $B = \dfrac{(100)(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(5\ \text{A})}{0.05\ \text{m}} = 1.26\times10^{-2}\ \text{T}$

3 $B = \dfrac{(4\pi\times10^{-7}\ \text{T.m/A})(500\ \text{A})}{2\pi(0.02)} = 5.0\times10^{-3}\ \text{T}$

إن استخدام ملفات عديدة اللفات ، وسيلة لمضاعفة الأثر الناشئ عن تيار صغير من حيث خلق مجالات مغناطيسية . ويشير هذا المثال التوضيحى أيضًا إلى الفروق الناتجة عن اختلاف هندسة التيارات وما تحدثه فى قيمة B .

مثال 3 - 19 :

يوضح الشكل 25-19 سلكًا طويلاً جدًا ومستقيمًا ، يحمل تيارًا $I = 50$ A إلى أعلى . كما أن هناك ملفًا على هيئة مربع طول ضلعه 2 cm وقد وضع بحيث يكون ضلعاه AB و CD موازيين للسلك الطويل وبحيث يبعد الضلع AB عنه مسافة 1 cm . ويحمل الملف تيارًا $I_2 = 30$ A يتدفق فى اتجاه حركة عقارب الساعة كما هو مبين . عين اتجاهات القوة المغناطيسية المؤثرة على كل ضلع من أضلاع الملف وكذلك القوة الصافية التى يؤثر بها السلك المستقيم على الملف .

شكل 25-19:
أوجد القوة الصافية المؤثرة على العروة المربعة .

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يحدد اتجاه القوة المؤثرة على الضلعين AB و CD ؟

الإجابة : التيار I_2 فى الضلع AB يوازى التيار I_1 وتكون القوة بين التيارين المتوازيين تجاذبية . أى أن الضلع AB سينجذب نحو السلك الطويل . أما التيار فى الضلع CD فهو يوازى ويضاد التيار I_1 ولذا فالقوة المؤثرة على CD ستتجه بعيداً عن السلك .

سؤال : كيف أستطيع أن أحدد اتجاه القوى المؤثرة على الضلعين CB AD فى هاتين الحالتين يتعامد التيار I_1 مع I_2 .

الإجابة : تكون القوة المؤثرة على المربع ناتجة عن تفاعل التيار I_2 مع المجال الذى يخلقه I_1 . فإذا وجهت إبهامك الأيمن فى اتجاه I_1 ، فلابد أن تشير الأصابع إلى أن B_1 متجه إلى داخل الصفحة فى منطقة الملف .

سؤال : وماذا ينشأ عند تطبيق قاعدة اليد اليمنى على الضلعين AD و BC عندما استخدم هذا الاتجاه للمجال B_1 ؟

الإجابة : عند وضع الإبهام الأيمن فى اتجاه I_2 محازيًا الضلع AD ، بينما تشير الأصابع باتجاه B_1 فلابد أن نستنتج أن القوة (فى الاتجاه الذى تقوم راحة اليد فيه بالدفع) ستشير إلى أعلى . وبنفس القاعدة تستطيع إثبات أن القوة المؤثرة على CB ستتجه إلى أسفل .

سؤال : وهل تكون هنا محصلة لمركبة القوة إلى أعلى أو إلى أسفل ؟

الإجابة : اتجاها القوتين المؤثرتين على AD و BC متعاكسان . فإذا اخترت قطعة صغيرة من كل من هذين الضلعين وتقع على نفس المسافة من السلك ، فإن القوتين المؤثرتين على القطعتين تلغى كل منهما الأخرى . وبنفس الطريقة يمكنك إثبات أن مقابل كل نقطة على الضلع AD تتعرض لقوة متجهة إلى أعلى ، ستكون هناك نقطة مناظرة على الضلع BC تتعرض لقوة مساوية متجهة إلى أسفل وهكذا فإن القوى الكلية المؤثرة على هذين الضلعين تتلاشى .

سؤال : ولماذا تكون هناك قوة صافية تؤثر على الملف ؟

الإجابة : إن المجال المغناطيسى يكون أقوى بالقرب من السلك ولهذا فإن القوة المؤثرة على AB ستكون أكبر من تلك المؤثرة على CD ، على الرغم من أن التيار I_2 المار خلال AB و CD هو نفس التيار .

سؤال : ما هو التعبير المحدد للقوى المؤثرة على AB و CD ؟

الإجابة : يعطى مقدار القوة بين التيارين المتوازيين أو المتوازيين ومتضادين بالمعادلة 19-8 :

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

حيث $d = 1\ cm$ بالنسبة للضلع AB و $d = 3\ cm$ بالنسبة للضلع CD .

الحل والمناقشة : القوى المؤثرة على وحدة الأطوال من AB و CD هى :

$$\frac{F_{AB}}{L} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T.m/A})(20\ \text{A})(30\ \text{A})}{2\pi\,(0.01\ \text{m})} = 0.030\ \text{N/m}$$ (إلى اليسار)

$$\frac{F_{CD}}{L} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T.m/A})(20\ \text{A})(30\ \text{A})}{2\pi\,(0.03\ \text{m})} = 0.010\ \text{N/m}$$ (إلى اليمين)

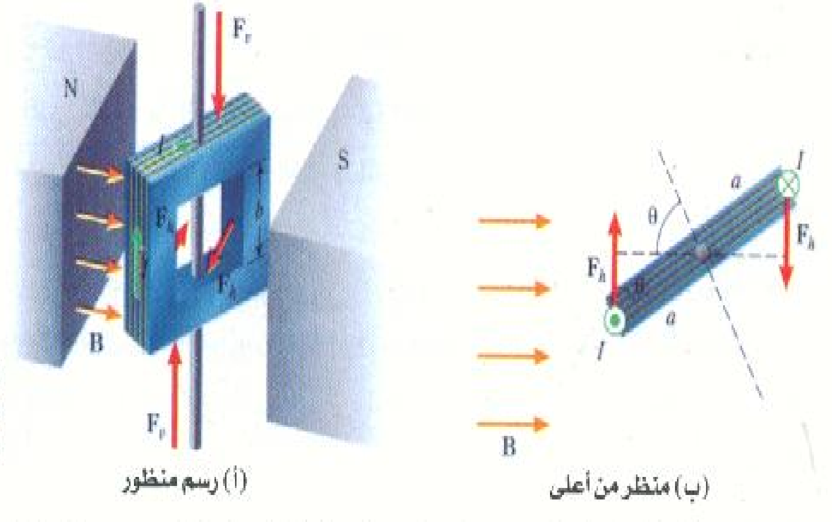
وتكون محصلة القوة المؤثرة على الملف هى

$$F_{net} = (0.030\ \text{N/m} - 0.010\ \text{N/m})(0.02\ \text{m}) = 4 \times 10^{-4}\ \text{N}$$

وتكون فى اتجاه السلك . ويلاحظ أيضاً أن القوى المؤثرة علـى كـل أضـلاع الملـف تميـل على جعله يتمدد .

19-12 عزم الدوران المؤثر على عروة (حلقة) تيار

يستخدم فى كثير من الأجهزة العملية ، بما فيها المحركات وكثير مـن أجهزة القياس عزم الدوران الذى تعانيه عروة تيار عند وضعها فـى مجـال مغناطيسـى . وسنرجع إلى الشكل 26-19 (أ) لكى نتعرف على كيفية ظهور عزم الدوران هذا ، حيث يرى بالشكل ملف يحمل تياراً فى مجال مغناطيسى . والملف مثبت على محور ويمكنه الدوران حولـه . وباستخدام قاعدة اليد اليمنى فإننا نحصل على القوى المؤثرة على مختلف الأضـلاع كمـا هو بالشكل . ويلاحظ أن قوتين فقط F_h هما اللتان تتسببان فـى خلـق عـزم دوران حـول المحور . وحتى هاتان القوتان لا يمكن أن ينتـج عنـهما عـزم دوران ، إذا كـان مسـتوى الملف عموديا على مجال المغناطيس ، لأنه عندئذ يكـون ذراعـا الرافعـة بالنسـبة لمحـور الدوران صفراً لكل من القوتين . ويحدث أقصى عزم دوران عندما تـنزلق خطـوط المجـال المغناطيسى على سطح الملف ، أى عندما تقع خطوط المجال فى مسـتوى الملـف ، لأنـه عندئذ تكون ذراع الرافعة بالنسبة للقوة F_h عند أقصى قيمة لـها .



شكل 26-19:
يجعل المجال المغناطيسى الخارجى الملـف الحامل للتيار يتعرض لعزم دوران .

وسنقوم الآن بالحصول على تعبير كمى لعزم الدوران المؤثر على الملف ، مع ملاحظـة أن كلاً من القوتين F_h سيكون لـها عزم دوران هو :

(ذراع الرافعة) (F_h)

ويوضح الشكل 26-19 (ب) أن ذراع الرافعة (أو ذراع القوة) هو $a \sin \theta$ ومنه يتضح أن العزم الدوراني المؤثر على الملف هو

$$\text{عزم الدوران} = 2 F_h a \sin \theta$$

حيث θ هي الزاوية المحصورة بين B والعمود المقام على مساحة سطح الملف . ولكن F_h ليست سوى القوة المؤثرة على الضلع الرأسي للملف . فلو كان طول الضلع الرأسي هو b والتيار هو I ، فإن كل سلك رأسي سيسهم بقوة مقدارها BIb في F_h . على أن الملف يحتوي على N حلقة (أو لفة) ولهذا فإن القوة $F_h = NBIb$ ويصبح عزم الدوران :



$$\text{عزم الدوران} = (2\,ab)\,(NI)\,(B \sin \theta)$$

مع ملاحظة أن $2\,ab$ ليست سوى مساحة الملف A . ونستطيع من ثم أن نكتب

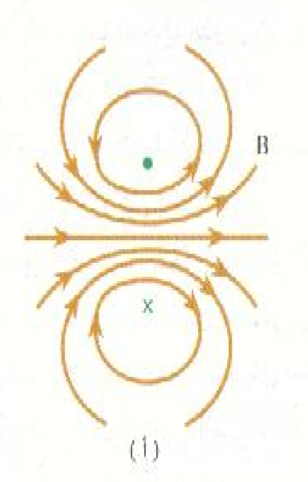
$$\text{عزم الدوران} = A\,(NI)\,(B \sin \theta) \qquad (19\text{-}12)$$

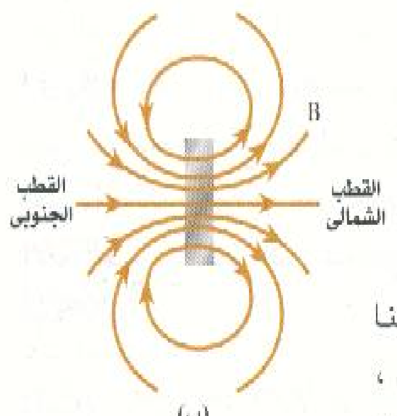
والمعادلة 12-19 صالحة للتطبيق لجميع الملفات المسطحة ، على الرغم من أننا قمنا باشتقاقها لملف له شكل خاص جدًا . وحيث أن NI هو التيار الذي يدور في الملف ، فإن من أهم سمات الملف (إلى جانب اتجاهه) مساحته والتيار المار فيه . ومن المعتاد في ضوء هذا أن نعرف كمية نطلق عليها **العزم المغناطيسي** لعروة التيار :

$$\mu = \text{العزم المغناطيسي} = AI_{tot} = A(NI) \qquad (19\text{-}13)$$

ويلاحظ أن وحدات العزم المغناطيسي هي $A.m^2$. من المهم هنا التنبيه إلى عدم الخلط بين رمز الانفاذية μ_0 والعزم المغناطيسي μ ، فعلى الرغم من استعمالنا لنفس الحرف الإغريقي إلا أن الرمزين يمثلان كميتين مختلفتين تمامًا .

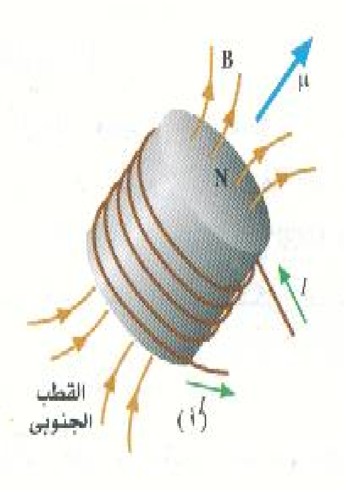
وهناك فائدة محددة من اعتبار عروة التيار كما لو كانت قضيبًا مغناطيسيًا يتميز بعزمه المغناطيسي ، كما سنرى بعد قليل .

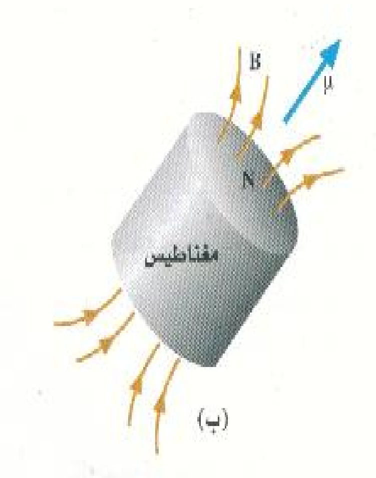


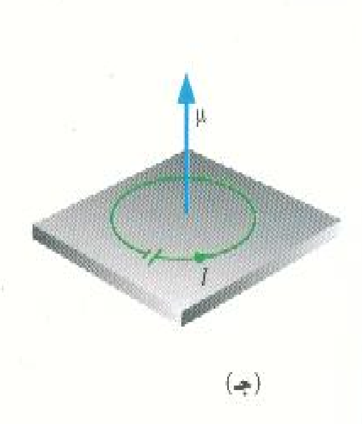


شكل 27-19:
يلاحظ هنا كيف أن حلقة التيار تعمل كقضيب مغناطيسي قصير ، ويتم تمثيل اتجاه التيار بالرمزين • و × في الجزء (أ) .

شكل 28-19:
يعمل الملف المرسوم في الجزء (أ) كالقضيب المغناطيسي المبين في (ب) . لاحظ كيفية تحديد العزم المغناطيسي μ في (جـ)







إذا قارنّا نمط المجال الذى ينشأ إما عن عروة تيار (الشكل 27-19 أ) أو عن ملف لولبى (الشكل 28-19 أ) مع الذى ينشأ عن قضيب مغناطيسى فسنجد أن المجالات متماثلة جدًا . ويلاحظ أن كلا من العروة والملف يعملان كقضيب مغناطيسى قصير . وعلاوة على ذلك فإن الملف والعروة إذا وضعا فى مجال مغناطيسى فإنهما سيتعرضان لعزم دوران فى نفس اتجاه عزم الدوران المؤثر على قضيب مغناطيسى . فعلى سبيل المثال ، لو كان يتجه من اليسار إلى اليمين كما فى الشكل 27-19 و 28-19 فإن النبيطات الثلاث أجمعها ستتعرض لعزم دوران فى اتجاه حركة عقارب الساعة .

ويمكننا الحصول على أقصى فائدة من مفهوم العزم المغناطيسى إذا حددنا اتجاهه . ويوضح الشكل 28-19 الاتجاه المميز للعزم μ ، حيث يلاحظ أن μ متجه على امتداد محور المغناطيس ، أو العروة أو الملف بطريقة تجعله يتبع اتجاه الخط المركزى للمجال الذى يخترق الملف . وهناك طريقة مفيدة لوصف اتجاه μ وهى تتضمن قاعدة أخرى لليد اليمنى : إذا ضممت أصابع يدك اليمنى لتتخذ اتجاه دوران التيار فى الملف فإن إبهامك اليمنى سوف تشير باتجاه μ . ونتيجة لهذا فإن متجه العزم المغناطيسى μ سيشير إلى الاتجاه الخارج من القطب الشمالى للمغناطيس المكافئ للملف . ويؤدى هذا إلى النتيجة المهمة التالية :

تدور عروة (حلقة) تيار موضوعة فى مجال مغناطيسى بحيث يصطف متجه عزمها المغناطيسى موازيًا لمتجه المجال المغناطيسى . ويكون عزم الدوران المؤثر على العروة هو

$$\text{العزم} = \mu B \sin\theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين μ و $\mathbf{B}$.

ويمكنك تقدير صحة هذا إذا تذكرت أن أبرة البوصلة ليست سوى قضيب مغناطيسى صغير وأن اتجاه المجال يتحدد بأنه الاتجاه التى تصطف فيه الإبرة . وسوف نجد من المناسب - من حين لآخر - أن ننظر إلى عروة التيار على أنها مغناطيس ذو عزم مغناطيسى مقداره μ .

مثال 4 - 19 :

أُدخل ملف صغير ذو عشر لفات ، ونصف قطره 5 cm داخل ملف لولبى بحيث كان مستوى الملف يصنع زاوية مقدارها 45° بالنسبة لمحور الملف اللولبى (الشكل 29-19) . وكان الملف اللولبى يحتوى على 1000 لفة فى المتر من طوله ويحمل تيارًا مقداره 25 A يتدفق فى الاتجاه الموضح بالشكل . ما هو عزم الدوران الذى يتعرض له الملف الصغير ؟

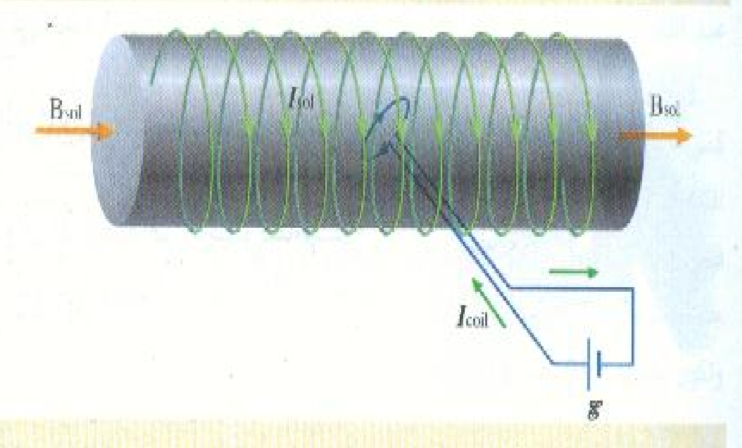
استدلال منطقى :

سؤال : على أى المقادير يعتمد عزم الدوران ؟

الإجابة : يعتمد على العزم المغناطيسى للملف وعلى المجال المغناطيسى الذى يوضع

فيه وعلى الزاوية بين μ و **B** . وبشكل محدد ، فإن :

$$\tau = \mu B \sin \theta$$



شكل 29-19:
أوجد عزم الدوران المؤثر على الملف الصغير .

سؤال : ما هو تعريف العزم المغناطيسى ؟

الإجابة : $\mu = AI_{tot} = A(NI)$ والمساحة $A = \pi r^2$ ، حيث r هو نصف قطر الملف .

سؤال : ما هو اتجاه μ ؟

الإجابة : إذا كانت أصابع اليد اليمنى وهى منقبضة تدل على اتجاه التيار بالملف فإن الإبهام اليمنى تشير فى اتجاه μ ، وهو متعامد مع مستوى الملف .

سؤال : ما هى المعادلة الدالة على المجال المغناطيسى الخاص بالملف اللولبى ؟

الإجابة : $B = \mu_0 nI$ ، حيث n هى عدد اللفات فى وحدة الأطوال من الملف اللولبى .

سؤال : ما هو اتجاه مجال الملف اللولبى ؟

الإجابة : يمكن تحديده بنفس الطريقة التى يتحدد بها العزم المغناطيسى للملف الصغير .

سؤال : ما هو الاتجاه الذى يؤثر فيه عزم الدوران ؟

الإجابة : سيميل العزم إلى إدارة الملف بحيث يكون μ فى اتجاه **B** .

الحل والمناقشة : إن يدك اليمنى ستدلك على أن اتجاه μ يقع عند زاوية مقدارها 45° أسفل الخط الأفقى إلى اليمين فى الشكل 29-19 . وبالمثل فإن اتجاه **B** فى الملف اللولبى سيكون أفقيًا إلى اليمين .

والعزم المغناطيسى للملف الصغير هو :

$$\mu = (10 \text{ turns})\,(0.060 \text{ A})\,\pi\,(0.05 \text{ m})^2 = 4.7 \times 10^{-3} \text{ A.m}^2$$

والمجال المغناطيسى داخل الملف اللولبى هو

$$B = (4\,\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})\,(1000 \text{ turns/m})\,(25 \text{ A}) = 3.14 \times 10^{-2} \text{ T}$$

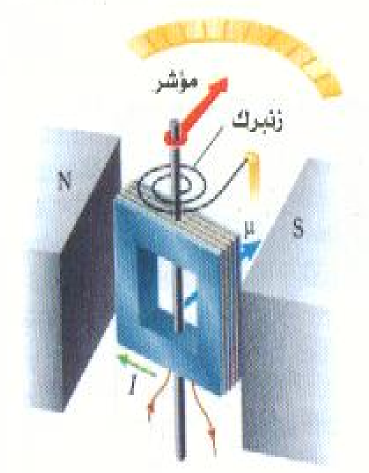
ومن ثم يكون العزم المؤثر على الملف هو

$$\tau = (4.7 \times 10^{-3} \text{ A.m}^2)(3.14 \times 10^{-2} \text{ T}) \sin 45^\circ$$

$$= 1.04 \times 10^{-4} \text{ m.N}$$

وقد لا يكون واضحًا على الفور أن هذه الوحدات ناتجة من الحسابات . وعليك التأكد من قدرتك على إثبات أنه كذلك . وتستطيع اعتبار الملف بمثابة إبرة بوصلة

عزمها μ فى اتجاه القطب الشمالى . وسيعيل العزم الدورانى إلى إدارة الملف فى اتجاه عكس حركة عقارب الساعة حول محور متعامد مع محور الملف اللولبى بنفس الطريقة التى تميل الإبرة المغناطيسية إلى الاصطفاف بها فى اتجاه **B** .

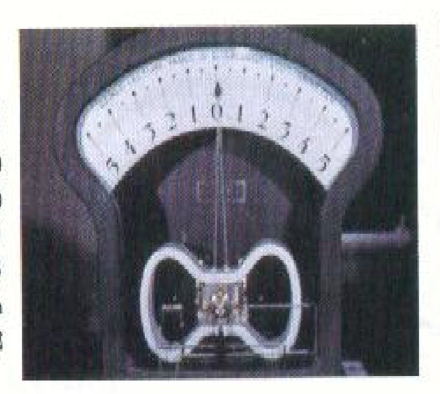


شكل 30-19:
التيار المار فى ملف الجلفانومتر يجعله يدور فى المجال المغناطيسى للمغناطيس الدائم .

13-19 الجلفانومترات والأميترات والفولتميترات ذات الملف المتحرك

لقد رأينا أن الملف الحامل للتيار يتعرض لعزم دوران إذا وجد فى مجال مغناطيسى . وحيث أن العزم الدورانى يتناسب مع التيار المار فى الملف فإن هذا التأثير يمكن استعماله لقياس التيار .

وحتى نتعرف على كيفية الاستفادة من هذا التأثير ، سنشير إلى الشكل 30-19 حيث يرى ملف حامل للتيار ، موضوع بين قطبى مغناطيس وعندما يكون التيار فى الاتجاه المبين ، فإن الملف يسلك سلوك مغناطيس ، قطبه الشمالى فى الناحية الخلفية (اختبر صحة هذه المقولة) . وسنشير إلى هذه الحقيقة بمتجه عزم مغناطيسى μ .



(أ) يوضح جلفانومتر ذا ملف متحرك وبداخله المغناطيس الدائم والملف المتحرك والمؤشر المتصل به .
(ب) صورة مقربة لمحور الملف داخل المغناطيس الذى يحيط به . وإذا مر تيار ضئيل فإنه يؤدى إلى انحراف تسهل قراءته للمؤشر .

وحيث أن متجه العزم المغناطيسى يحاول أن يكون بحزاء المجال ، فإنه الملف يدور بحيث يجعل هذا المتجه مصوبًا نحو القطب الجنوبى للمغناطيس الدائم . ولكن هذا الدوران يتوقف عند حد معين نظرًا لوجود زنبرك مثبت بالملف ليزوده بعزم دورانى مضاد . أى أن الملف سيدور مقدارًا يتناسب مع شدة التيار المار به . وعلى هذا يكون مقدار هذا الدوران الذى سيشير إليه مؤشر مثبت بالملف ، مقياسًا للتيار المار فى الملف .

الجلفانومترات

عادة ما نطلق على الجهاز المرسوم تخطيطيًا فى الشكل 30-19 **حركة مقياس** ويزود الملف عمليًا بقلب من الحديد لتقوية المجال والعزم الدورانى . وكثير من أجهزة القياس بالغة الحساسية ، والمسماة جلفانومترات ، هى ببساطة حركة كهذه موضوعة فى غلاف مناسب . ولهذا يشيع استعمال المصطلحين **حركة مقياس وجلفانومتر** ليؤديا نفس المعنى .

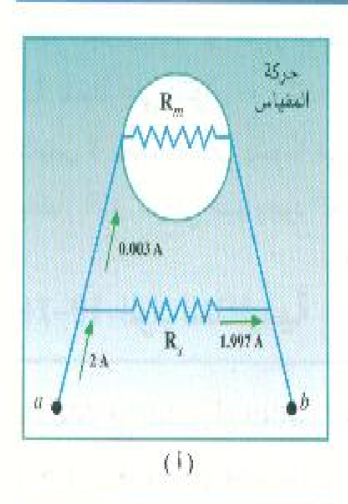
وتعتمد حساسية حركة المقياس ـ بمعنى مدى الانحراف الحادث عند مرور مقدار معين من التيار ـ على عدة عوامل . ومن الطبيعى أن تكون صلابة زنبرك الاسترجاع من أهم تلك العوامل . فالزنبرك ـ من ناحية ـ لابد أن تكون لديه استجابة معقولة لقياس

تيارات صغيرة ، ومن ناحية أخرى لا يجب أن يكون هشًا إذا كان على الجهاز أن يكون متينًا وقابلاً للحمل . كما تعتمد الحساسية على عدد لفات الملف ، فإذا تضاعف عدد اللفات فإن عزم الدوران يتضاعف تبعًا لذلك .

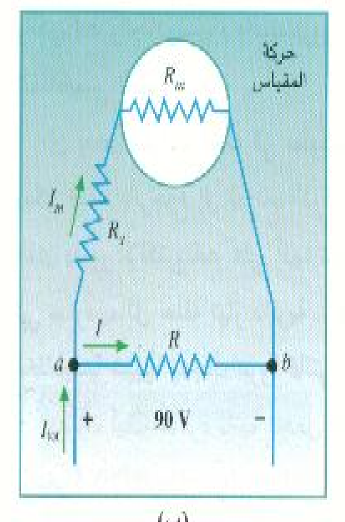
وينحرف الجهاز شديد الحساسية إلى أقصى مدى له ، إذا مر به تيار لا يزيد على كسر من الميكرو أمبير . ولابد لمثل هذا المقياس بالغ الحساسية أن يكون له عدد كبير من لفات السلك بالملف ، وهذا ما يجعل مقاومته تصل إلى 100 Ω بسهولة . وحتى مع هذا فإن جهدًا مقداره 10^{-4} V بين طرفيه سيجعل تيارًا 10^{-6} A يمر به . وتنحرف معظم جلفانومترات المنضدة عمومًا لأقصى مدى عند مرور تيار يبلغ 1 mA(10^{-3} A) بها ، وتكون مقاومتها نحو 20 Ω .

الأميترات

ولقياس التيار المار في أحد فروع دائرة ما ، فإن أحد أجهزة القياس ذات الملف المتحرك يدمج في ذلك الفرع . وفي هذه الحالة يسمى الجهاز **أميتر** . ولابد لكي يؤدي الجهاز وظيفته على الوجه الصحيح أن يحقق شرطين فمن المهم أولاً ألا يتسبب وجود الجهاز في الدائرة في أي تغير محسوس في التيار المار فيها والمراد قياسه . أي أن مقاومة الجهاز لابد أن تكون أقل بكثير من مقاومة الفرع عندما لا يكون الجهاز متصلاً . وفضلاً عن ذلك فإن حركة الجلفانومتر الأساسية لابد أن تؤدي إلى أقصى انحراف عند مرور تيار نحو 1 mA خلاله . فإذا أريد للجهاز أن يقيس تيارات أكبر من هذا وليكن 1 A ، فإن معظم هذا التيار لابد أن يتفرع جانبًا ولا يسمح سوى لتيار صغير 1 mA أن يمر خلال ملف الجهاز ويتحقق هذان الهدفان إذا وصلت مقاومة صغيرة تسمى **مجزئ التيار** (تتصل دائمًا ليتفرع إليها التيار) على **التوازي** مع ملف الجهاز كما هو موضح في الشكل 31-19 (أ) . ومقاومة المجزئ يتم اختبارها بحيث تكون أصغر بكثير من مقاومة الملف R_m . ويؤدي هذا إلى الأثر المطلوب ، وهو أن يتفرع معظم التيار ليمر خلال المجزئ . ومن ناحية أخرى فإن المقاومة المكافئة للمجموعة المتصلة على التوازي تكون أصغر من أي من المقاومتين بالمجموعة ـ وهكذا فالجهاز ذو المجزئ إذا وصل بفرع دائرة ما فإن ما يضيفه من مقاومة إلى الفرع يكون أقل من قيمة مقاومة المجزئ نفسه وبهذا لا يكون للتغيير الحادث في الدائرة أثر يذكر .



(أ)



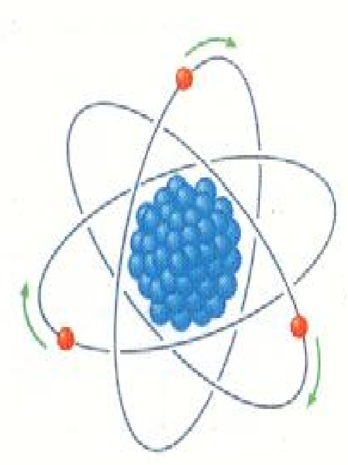
(ب)

شكل 31-19:
(أ) لا يمر خلال حركة الأميتر سوى جزء صغير من التيار . أما معظم التيار فإنه يمر خلال المقاومة المتصلة على التوازي R_s . وبالنسبة لقيم التيار الموضحة فإن ، $R_s = R_m /666$. وهذا مثال على مدى صغر القيم النموذجية للمقاومة R_s .
(ب) وحتى يكون التيار المار خلال الفولتميتر صغيراً جدا فإن مقاومًا كبيرا جدا R_x يتصل على التوالي مع ملف الجهاز . وبالنسبة للرسم المبين فإن R_x تتخذ في الغالب المقدار 90.000 Ω أو أكثر .

الفولتميترات

ويمكن توصيل جهاز قياس ذي ملف متحرك على التوازي مع عنصر الدائرة R لقياس فرق الجهد عبره (الشكل 31-19 ب) ويسمى الجهاز في هذه الحالة **فولتميتر** ويكون فرق الجهد عبر الجهاز هو نفسه الموجود عبر عنصر الدائرة . ومرة أخرى ، وحتى لا يسحب ملف الجهاز تيارًا أكبر من نحو 1 mA ، فإن معظم

التيار لابد من منعه من المرور خلال الملف . وهذا ما يتم عمله بإضافة مقاومة كبيرة R_s متصلة على التوالى مع الملف . وهذا من شأنه أيضًا أن يؤكد أن وجود جهاز القياس لا يحدث تغييرًا ملموسًا فى التيار المار فى الفرع المحتوى على R مقارنة بالتيار الذى يمر فى عدم وجود الجهاز .



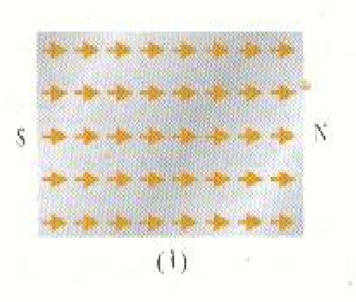
شكل 32-19:
تتصرف الإلكترونات التى تدور فى مدارات كحلقات التيار ، وتولد بذلك مجالات مغناطيسية .

19-14 المواد المغناطيسية

لقد تعلمنا فى المدارس أن المغناطيسات تجذب الحديد ، بينما لا تجذب معظم المواد الأخرى . وقد وجد أن هناك عددًا قليلاً من المواد **الفيرومغناطيسية** (كالحديد والنيكل والكوبالت والجادولينيوم والديسبروزيوم وسبائكها) هى التى تتأثر تأثرًا بالغًا بالمجال المغناطيسى الثابت .

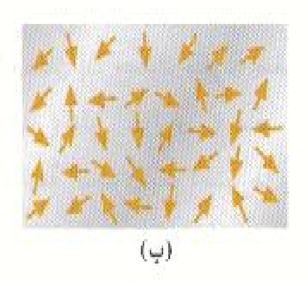
إن بعض الذرات تشبه فى سلوكها قضبان مغناطيسية صغيرة جدًا والسبب فى ذلك يمكن فهمه بالرجوع إلى نموذج الذرة الذى يستعمل دائمًا والمبين فى الشكل 32-19 الذى يصور الإلكترونات على أنها تدور حول النواة فى مدارات . وحيث أن الإلكترون فى مداره يماثل حلقة تيار دائرية ، فإن كل إلكترون فى الشكل 32-19 ولد مجالاً مغناطيسيًا شبيهًا بمجال عروة كالتى فى الشكل 23-19 .

وهناك أيضًا ظاهرة ثانية تجعل الذرات تسلك مسلك المغناطيسات . أن الجسيمات الصغيرة كالإلكترونات والبروتونات تتصرف كما لو كانت تدور حول نفسها (مغزليًا) ، ولذا يقال أن لهذه الجسيمات **لف مغزلى** (أو درور) وأى شحنة تلف حول نفسها ، فهى فى الواقع تعمل كعروة تيار وتخلق بذلك مجالاً مغناطيسيًا .

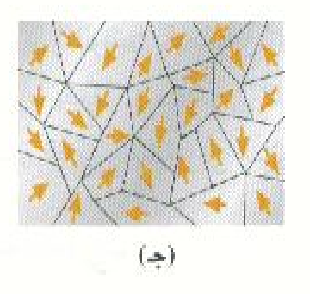


(أ)

والتأثيرات المغناطيسية للإلكترونات يلغى بعضها بعضًا فى كثير من الذرات . أما فى ذرات أخرى فإن الإلغاء يكون كاملاً تقريبًا ، ولكن ليس تمامًا . أما فى ذرات العناصر الانتقالية فحسب وهى العناصر الفيرومغناطيسية المذكورة ، منذ قليل ، فإن إسهامات ما يكفى من الإلكترونات تضاف إلى بعضها البعض لتضفى على كل ذرة عزمًا مغناطيسيًا كليًا ذا قيمة محسوسة . وهكذا تبدو هذه الذرات كأبر البوصلة الدقيقة للغاية . فإذا اصطفت أغلب هذه الذرات معًا داخل عينة ذات أبعاد معقولة من مادة فرومغناطيسية ، فإن العينة تصبح **ممغنطة** . وسنقوم بفحص هذه الحالة عن قرب أكثر .



(ب)



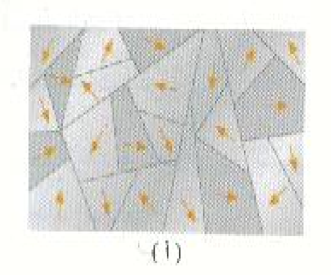
(جـ)

نعلم جميعًا ، أننا لو وضعنا مجموعة من المغناطيسات الدقيقة بالقرب من بعضها البعض لأقصى ما يمكن ، فإنها تقوم بترتيب أنفسها بحيث يصبح كل قطب جنوبى قريبًا من قطب شمالى ، نتيجة لتجاذب الأقطاب المختلفة وتنافر المتشابهة . ونصل إلى حالة أدنى طاقة وضع للنظام عندما تصبح المغناطيسات على نحو يشبه ما هو موضح بالشكل 33-19 (أ) . ويلاحظ أن المغناطيسات المرتبة بهذه الطريقة إنما تكافئ مغناطيسا واحدًا كبيرًا .

شكل 33-19:
(أ) قطعة حديد ممغنطة ، (ب) قطعة الحديد غير الممغنطة وغير المرتبة مرسومة تخطيطيًا ، (جـ) رسم أكثر واقعية للنطاقات المغناطيسية .

فإذا حركت هذه المغناطيسات بعنف (ربما إذا هز شخص ما اللوح الذى تتراص عليه عند استقرارها) ، فإنها ستتحرر من النظام الذى كانت عليه ويظهر الشكل 19-33 (ب) . ويلاحظ فى هذه الحالة أن المغناطيسات المنفردة لم تعد مصفوفة معًا لتكون قضيبًا مغناطيسيًا قويًا .

ويتحقق وضع مشابه لهذا بالنسبة للذرات داخل الجسم الصلب ، حيث تقوم الاهتزازات الحرارية بتحريك النظام فتمنع الذرات بهذا من ترتيب أنفسها كما فى الشكل 19-33 (أ) . على أن مغناطيسات ذرية معينة فقط - كالحديد والمواد الفرومغناطيسية الأخرى - هى التى تستطيع الاحتفاظ باصطفافها عند درجات الحرارة العادية . وحتى هذه الذرات تكتسب ما يكفى من الطاقة الحرارية عند تسخينها بدرجة مناسبة ، لكى تتحرر من النظام الذى كانت عليه وتتضارب اتجاهاتها كما فى (ب) . ودرجة الحرارة التى يحدث عندها هذا محددة تمامًا لكل نوعية من الذرات وتسمى **درجة حرارة كورى** . وهناك قوى أخرى أكثر تعقيدًا بكثير بين الذرات الفرومغناطيسية إلى جانب القوة المغناطيسية طبعًا . ولا يمكن فهم هذه القوة إلا فى إطار ميكانيكا الكم ولذا لن نتمكن من الاسترسال فى مناقشتها هنا ، وإن كانت تلعب دورًا رئيسيًا فى ترتيب المغناطيسات الذرية .



(أ)

S N

(ب)

شكل 34-19:
(أ) نطاقات متجهة عشوائيًا فى عينة غير ممغنطة . (ب) تنمو النطاقات المصفوفة فى اتجاه المجال على حساب النطاقات غير المصفوفة فى اتجاه المجال وذلك عندما توضع المادة فى مجال مغناطيسى خارجى . وهذا ما يكسب العينة مجالاً مغناطيسيًا صافيًا .

وتكون المغناطيسات الذرية لمعظم المواد - إذا وجدت - متجهة عشوائيًا كما فى الشكل 19-33 (ب) . إلا أن المواد الفرومغناطيسية تتكون عادة من مناطق صغيرة تكون الذرات فى كل منها مصفوفة فى اتجاه واحد . ويُسمى كل من هذه المناطق المرتبة **نطاقًا** (الشكل 19-33) . وتحتوى قطعة الحديد العادية على نطاقات بكل منها نحو 10^{16} ذرة . ومعنى هذا أن الأبعاد الخطية للنطاق ليست سوى كسر صغير من المليمتر . على أن النطاقات فى قطعة حديد غير ممغنطة تأخذ اتجاهات عشوائية كما فى الشكل 34-19 (أ) . وعند مغنطة قضيب من الحديد فإن على النطاقات بداخله أن تصطف فى صفوف ، ويتم هذا على النهج التالى .

سنفترض أننا بدأنا بقضيب من الحديد وكان غير ممغنط كما يوضح الشكل 34-19 (أ) وكما نعلم فإن للملف اللولبى الذى يحمل تيارًا مجال مغناطيسى يتخلل لفاته . والآن ، سنضع القضيب الحديدى فى الملف اللولبى ؛ حيث تتعرض النطاقات لقوى من جانب المجال المغناطيسى للملف . وستنمو تلك النطاقات التى تتخذ اتجاه المجال ، بينما يتقلص حجم تلك التى تتخذ اتجاهات أخرى . والنتيجة النهائية لهذه العملية هى جعل النطاقات تصطف موازية للمجال كما هو موضح فى الجزء (ب) . لقد أصبح الحديد الآن قضيبًا مغناطيسيًا له قطب شمالى وآخر جنوبى . فإذا كان من السهل توجيه النطاقات فإننا نتعامل مع **حديد مطاوع** ، أما فى حالة **الحديد الصلب** فلابد من أن يكون المجال الخارجى قويًا جدًا أو أن ترج النطاقات بالحرارة أو بطرق ميكانيكية حتى يمكن جعلها تنمو فى اتجاه المجال . (إن تمييز الحديد بصفتى **المطاوع والصلب** يعود إلى الخواص المغناطيسية فحسب ولا علاقة لهما بالصلابة

الفيزيائية) . وعلى أية حال من الممكن ترتيب النطاقات بشكل تام تقريبا للحصول على قضيب مغناطيسى قوى .

وإذا ما تم ترتيب النطاقات فى صفوف فإن المجال المغناطيسى يصبح مكونًا من جزءين . أولهما المجال الصغير الأصلى للملف اللولبى ، وثانيهما المجال الذى يخلقه القضيب المغناطيسى وهو أكبر مئات المرات ـ عادة ـ من مجال الملف اللولبى . **وتسمى المجموعة المكونة من ملف لولبي وقطعة من الحديد المطاوع مغناطيسًا كهربائيًا .**

وعندما يطفأ التيار المار فى الملف اللولبى ، فإن النطاقات فى قضيب الحديد المطاوع تعود تقريبًا إلى الحالة العشوائية الأصلية التى كانت عليها ، وذلك لأن الحركة الحرارية تجعل النطاقات تتبعثر . وهذا الوضع مطلوب فى المغناطيس الكهربى لأنه يتيح لنا أن نديره أو نطفئه حسب الطلب . ومن ناحية أخرى فإن قطعة من الحديد الصلب إذا وضعت داخل ملف لولبى فإنها ستحتفظ بمعظم ترتيبها عند إخراجها من الملف اللولبى وتصبح بهذا قضيبًا مغناطيسيًا دائمًا .

ويمكن تمييز درجة استجابة المادة لمجال مغناطيسى خارجي ، بواسطة كمية تسمى **الإنفاذية المغناطيسية النسبية** ، K_m . افترض ، مثلاً ، أن لدينا ملفًا لولبيًا طويلاً جدًا يحمل تيارًا يخلق مجالاً B_0 ، وسنقوم بملء باطن هذا الملف بمادة ما . فيصبح المجال الكلى هو B ويتكون من مجموع B_0 وأى مجال ناشئ عن اصطفاف المغناطيسيات الذرية .

تعرف الإنفاذية المغناطيسية النسبية K_m لمادة ما، بإنها النسبة بين المجال الكلى B والمجال المغنط B_0 :

$$K_m = \frac{B}{B_0}$$

وتتراوح قيم K_m فى المواد الفرومغناطيسية بين 100000 – 100 والجدول 1–19 يورد بعضًا من هذه المواد وقيم K لها . كما يضم الجدول أيضًا فئتين من المواد الأخرى . فبعضها وهو يسمى مواد ديامغناطيسية يقلل من قيمة المجال . من ثم تكون قيم K_m له أقل من الواحد الصحيح وإشارتها سالبة . والبعض الآخر ويسمى مواد **بارامغناطيسية** وتزيد من قيمة المجال بشكل طفيف ولذا فإن قيم K_m لها أكبر قليلاً من الواحد الصحيح .

وسنلخص فيما يلى ما تعلمناه حول الخواص المغناطيسية للمواد . عندما توضع معظم المواد فى مجال مغناطيسى فإنها نادرًا ما تؤثر فيه . على أن عددًا قليلاً جدًا ؛ ومنها الحديد وسبائكه ترفع من شدة المجال المغناطيسى الذى توضع فيه ؛ ودائمًا ما يقوى المجال عدة مئات من المرات . وإلى هذه القدرة على تكبير المجال المغناطيسى ، تعود الأهمية الأولى للحديد فى كثير من تطبيقات المغناطيسية .

الجدول 1-19 قيم الإنفاذية المغناطيسية النسبية عند درجة حرارة الغرفة لمواد مختارة .

المادة	الإنفادية النسبية K_m
فيرومغناطيسية	
كوبالت	250
نيكل	600
حديد	5,000
سبيكة « بيرمالوى »	25,000
سبيكة « ميومتال »	100,000
بارامغناطيسية	
الهواء	1.0000004
ألومنيوم	1.000023
مغنسيوم	1.000012
يورانيوم	1.00040
ديامغناطيسية	
البزموت	0.99983
الزئبق	0.99997
الفضة	0.99998
النحاس	0.99999
الماء	0.99999

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) قاعدة اليد اليمنى لمجال مغناطيسى ، (ب) قاعدة اليد اليمنى لقوة مغناطيسية ، (جـ) شدة المجال المغناطيسى ، (د) وحدتى تسلا وجاوس ، (هـ) جهاز انتقاء السرعة ، (و) الملف اللولبى ، (ز) أثر هول ، (ح) المادة الفرومغناطيسية ، (ط) النطاق ، (ى) المغناطيس الكهربى ، (ك) العزم المغناطيسى ، (ل) حركة مقياس (م) مجزئ التيار (مقاومة متصلة على التوازى) . (ن) الإنفاذية المغناطيسية النسبية .

2 أن ترسم تخطيط المجال المغناطيسى بالقرب من (أ) مغناطيسات ذات أشكال مختلفة ، (ب) سلك مستقيم حامل للتيار ، (جـ) حلقة من سلك حاملة للتيار ، (د) ملف لولبى .

3 أن تستخدم بوصلة لتحديد اتجاه خطوط المجال فى منطقة ما .

4 أن تحسب مقدار واتجاه القوة المؤثرة على تيار فى سلك مستقيم موضوع فى مجال مغناطيسى معروف .

5 أن تستخدم المعادلة $F = B_{\perp}IL$ لتحسب إحدى الكميات إذا عُلمت الكميات الأخرى .

6 أن تستخدم المعادلة $F = qvB_{\perp}$ لتحسب إحدى الكميات إذا عُلمت الكميات الأخرى وتحسب نصف قطر المسار الذى يتبعه جسيم ذو شحنة وكتلة معلومتين ويتحرك عموديًا على مجال مغناطيسى معلوم .

7 أن تحسب المجال المغناطيسي (أ) على مسافة معينة من سلك مستقيم حامل للتيار ، (ب) عند مركز ملف به N لفة ويحمل تيارًا معلومًا (جـ) في باطن ملف لولبي يحمل تيارًا معلومًا . وأن تحسب الحالة (جـ) عندما يكون الملف اللولبي فارغًا وعندما يكون ممتلئًا بمادة ذات K_m معلومة .

8 أن تختار من قائمة المواد الشائعة ، تلك التي تغير المجال المغناطيسي بصورة كبيرًا إذا وضعت فيه .

9 أن تصف ما يحدث عندما يوضع قضيب من مادة مغناطيسية بدلالة النطاقات لو كان القضيب ممغنطًا أو غير ممغنط .

10 أن تشرح كيف يتيح لنا أثر هول تعيين إشارة ناقلات الشحنة .

11 أن تذكر الطريقة التي يدور بها ملف يحمل تيارًا عندما يكون في وضع معين في مجال مغناطيسي وأن تحسب عزم الدوران المؤثر على الملف عندما يكون هناك قدر كاف من البيانات .

12 أن تحدد مكان القطبين الشمالي والجنوبي بالنسبة لعروة تحمل تيارًا . وأن تشرح المقصود من متجه العزم المغناطيسي بالنسبة لعروة تيار .

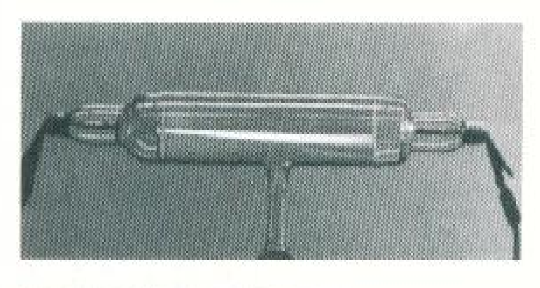
13 أن تشرح السمات الرئيسية لحركة مقياس . وأن تذكر كيف يستخدم لعمل أميتر أو فولتميتر .

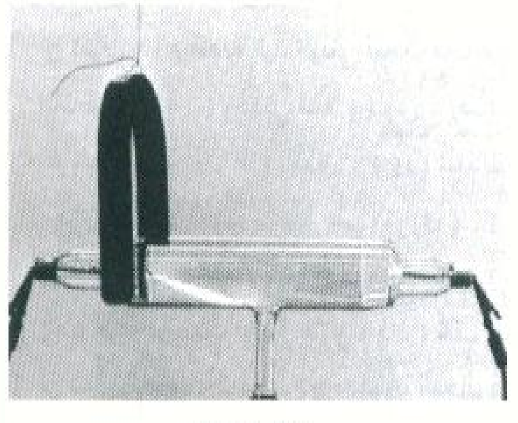
أسئلة وتخمينات

1 قرب القطب الشمالي لقضيب مغناطيس من مسمار حديدي غير ممغنط . ما الذي يفعله المجال المغناطيسي للمغناطيس في المسمار ؟ ولماذا ينجذب المسمار إلى المغناطيس ؟

2 وضعت عروتان دائريتان متحدتا المركز فوق منضدة . وكانت العروة الكبرى تحمل تيارًا مقداره 10 A ويتدفق في عكس اتجاه عقارب الساعة ، وتحمل الصغرى تيارًا مقداره 5 A في اتجاه عقارب الساعة . أوصف القوى المؤثرة على كل من العروتين .

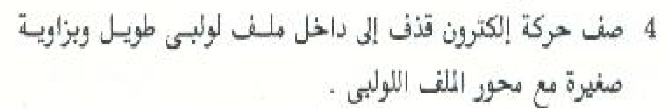
3 يوضح الشكل م 1-19 أن هناك سلكين عند جهد مرتفع يجعلان حزمة من الجسيمات المشحونة تقذف نحو اليمين خلال أنبوبة مفرغة جزئيًا . وتتم رؤية مسار الجسيمات باستخدام شاشة فلورية موضوعة على امتداد طول الأنبوبة وعند اقتراب مغناطيس من الأنبوبة فإن الحزمة تنحرف . كيف يمكنك تحديد إشارة الشحنة على تلك الجسيمات ؟





شكل م 1-19

4 صف حركة إلكترون قذف إلى داخل ملف لولبي طويل وبزاوية صغيرة مع محور الملف اللولبي .



5 يقال أحيانًا أن القطب الشمالي للأرض هو قطب جنوبي والعكس بالعكس . فما معنى هذا ؟

6 عندما تقذف حزمة من الإلكترونات في منطقة معينة من الفضاء ، فإن الإلكترونات تتحرك خلال تلك المنطقة في خط مستقيم . هل يمكننا استنتاج أنه لا يوجد مجال كهربي في تلك المنطقة ؟ أو أنه لا يوجد مجال مغناطيسي ؟

7 قذفت حزمة من الإلكترونات ، في تجربة معينة ، باتجاه المحور x الموجب فانحرفت نحو المحور y الموجب في المستوى xy . فإذا كان هذا الانحراف ناتج عن وجود مجال مغناطيسي ، فما هو اتجاه هذا المجال ؟ كرر المسألة لو كان هناك مجال كهربي بدلاً من المغناطيسي .

8 تنحرف حزمة من الجسيمات المشحونة عندما تمر خلال منطقة معينة من الفضاء . كيف يمكنك بعمل قياسات على حركة الحزمة أن تحدد المجال الذى يسبب الانحراف ؟ أهو مجال مغناطيسى أم كهربى ؟

9 قذف بروتون من أصل الإحداثيات باتجاه المحور x الموجب وكان هناك مجال مغناطيسى منتظم فى الاتجاه y الموجب . (أ) صف حركة البروتون موليًا اهتمامًا خاصًا بالأرباع التى يتحرك فيها . (ب) أعد السؤال بالنسبة لإلكترون . (جـ) أعد مرة أخرى لو أن $v_z = 0$ ، $v_x = v_y$. (د) أعد لو أن $v_z \neq 0$ ، $v_x = v_y$.

10 إننا نعرف أن الإلكترونات داخل أنبوبة التليفزيون تقذف من أحد طرفى الأنبوبة إلى الطرف الآخر حيث تصطدم بشاشة فلورسنتية . افترض أن أخاك الصغير يصر على أن مدرس العلوم العامة فى فصله يقول أن البروتونات هى التى تستعمل وليس الإلكترونات . كيف يمكنك أن تثبت له أنه مخطئ دون أن تضطر إلى فك الجهاز ؟

11 افترض أن لديك مادة رديئة التوصيل ولكنها مع ذلك توصل ، بما يكفى للحصول على تيار يمكن قياسه خلالها . كيف نستطيع تقرير ما إذا كان التيار مكونًا من شحنات موجبة أو سالبة ، أو من كليهما ؟ اقترح ما تشاء من الطرق المتعددة .

12 يقترح إيجاد قوة دفع لسفينة فضاء على النحو التالى . يتم توليد الكهرباء بواسطة مفاعل نووى أو بوسيلة أخرى . ثم تمرر تيارات ضخمة فى قضبان من النحاس مثبتة بسفينة الفضاء بحيث أن القوى المؤثرة على تلك القضبان بفعل المجال المغناطيسى للأرض تكون كافية لدفع السفينة . ما هى أوجه اعتراضك على مثل هذه الفكرة ؟

13 لا تستطيع الأشعة الكونية (وهى جسيمات مشحونة قادمة إلى الأرض من الفضاء الخارجى) أن تصل إلى سطح الأرض ما لم تكن طاقاتها عالية جدًا . وأحد أسباب ذلك أن عليها اختراق جو الأرض . على أنه بالنسبة للجسيمات القادمة نحو خط الاستواء على امتداد نصف قطر الأرض فإن التأثيرات المغناطيسية تكون هى الأخرى مهمة . اشرح السبب مبينًا لماذا تصل الجسيمات إلى القطبين دون مواجهة هذه الصعوبة .

14 حاول أن تعطى تقديرًا لرتبة مقدار الإزاحة التى تعانيها حزمة إلكترونية فوق شاشة التلفزيون تحت تأثير المجال المغناطيسى للأرض .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدات المجال المغناطيسى (B)

1 tesla (تسلا) $(T) = 1$ N.m/A

1 gauss (جاوس) $(G) = 10^{-4}$ T

إنفاذية الفراغ (μ_0)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$$

العزم المغناطيسى لعروة تيار (μ)

μ = المساحة × التيار الكلى بالعروة

$= ANI$

ووحدات μ هى $A.m^2$.

واتجاه μ هو اتجاه الإبهام اليمنى عندما تنقبض أصابع اليد اليمنى متخذة اتجاه التيار حول العروة .

تعريفات ومبادئ أساسية :

المجال المغناطيسي (B)

القوة المغناطيسية المؤثرة على وحدة الأطوال من سلك يحمل تيارًا فى مجال مغناطيسى **B** هى

$$B = \frac{F/L}{I}$$

حيث L هو طول السلك . وعندما تكون F و L و I معبرًا عنها بوحدات SI فإن B تقاس بوحدات تسلا (T) .

القوة المغناطيسية المؤثرة على تيار

تكون القوة المغناطيسية المؤثرة على وحدة الأطوال من سلك يحمل تيارًا فى مجال مغناطيسى **B** هى :

$$\frac{F}{L} = BI \sin\theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين **B** و **I** . ويكون اتجاه القوة متعامدًا مع كل من **B** و **I** بالترتيب الذى تحدده قاعدة اليد اليمنى .

خلاصة :

1 تكون القوة المغناطيسية المؤثرة على تيار ما عند أقصى قيمة لها إذا كان التيار **I** متعامدًا مع **B** وتكون صفرًا عندما يكون **I** موازيًا (أو موازيًا ومتضادًا) للمجال **B** .

قاعدة اليد اليمنى للقوة المغناطيسية المؤثرة على تيار

أشر بأصابع يدك اليمنى باتجاه المجال **B** على أن تشير الإبهام اليمنى باتجاه التيار . أما القوة المغناطيسية المؤثرة على التيار فتكون فى الاتجاه المواجه لراحة اليد

القوة المغناطيسية المؤثرة على شحنة متحركة

تتعرض شحنة q تتحرك بسرعة **v** فى مجال مغناطيسى **B** لقوة مقدارها ،

$$F = qvB_{\perp}$$

حيث $B_{\perp}$ هى مركبة **B** المتعامدة مع السرعة **v** . ويتحدد اتجاه القوة المؤثرة على الشحنات الموجبة باستخدام قاعدة اليد اليمنى للتيارات . أما اتجاه القوة المؤثرة على الشحنات السالبة فيكون عكس هذا .

خلاصة :

1 بما أن القوة المغناطيسية متعامدة دائمًا مع اتجاه الحركة **v** ، فإن المجال المغناطيسى الموازى للحركة لا يمكنه عمل شغل على شحنة متحركة .

2 سيجعل المجال المغناطيسى المنتظم الجسيم المشحون المتحرك ، يدور فى دائرة نصف قطرها

$$r = \frac{mv}{qB}$$

حيث m هى كتلة الجسم .

أثر هول

عندما يوضع موصل ذو مقطع مستعرض مستطيل الشكل فى مجال مغناطيسى متعامد مع التيار المار به فإن فرقًا للجهد يتكون ويكون متعامدًا مع كل من **I** و **B** وهذا هو ما يسمى بجهد هول الذى يعطى بالمعادلة :

$$V_H = vBd$$

حيث v هى السرعة المتوسطة « للانسياق » بالنسبة للشحنات الحاملة للتيار و d هو أحد أبعاد الموصل العمودى على **I** و **B** .
وتعتمد قطبية (إشارة) هذا الجهد على إشارة ناقلات الشحنة .

القوة المغناطيسية بين تيارين متوازيين

القوة المغناطيسية لوحدة الأطوال والتى يؤثر بها تياران متوازيان كل على الآخر .

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b}$$

حيث b هى المسافة بين التيارين . وتكون القوة تجاذبية لو كان التياران فى نفس الاتجاه وتنافرية لو كان أحدهما فى عكس اتجاه الآخر .

خلاصة :

1 تتخذ هذه الظاهرة لتعريف الأمبير . ثم يشتق كولوم الشحنة منه .

$$1\,C = 1\,A.s$$

المجال المغناطيسى الناشئ عن تشكيلات معينة للتيار

تيار طويل مستقيم :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

مركز ملف دائرى (نصف قطره a)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

فإذا كان بالملف N لفة ، يضرب الطرف الأيمن فى هذه المعادلة فى N .

الملف اللولبى

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L} = \mu_0 n I$$

حيث : L هو طول الملف اللولبى ، N العدد الكلى للفات ، n عدد اللفات لوحدة الأطوال

عزم الدوران المؤثر على عروة تيار

عندما توضع عروة تيار فى مجال مغناطيسى فإنها تميل إلى إدارة نفسها بحيث يتخذ عزمها المغناطيسى μ اتجاه المجال المغناطيسى **B** . ويعطى العزم الدورانى بالمعادلة :

$$\tau = \mu B \sin\theta$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين μ و **B** .

المواد المغناطيسية

تقاس استجابة المواد الموضوعة فى المجالات المغناطيسية بإنفاذيتها المغناطيسية النسبية K_m . ويعبر عنها بالنسبة بين المجال المغناطيسى الكلى B الناشئ عن وجودها فى مجال مغناطيسى خارجى B_0 إلى المجال الخارجى :

$$K_m = \frac{B}{B_0}$$

وبناء على هذا العامل تنقسم المواد إلى ثلاث فئات :

1 الفرومغناطيسية : $K_m \gg 1$

2 البارامغناطيسية : $K_m > 1$

3 الدايا مغناطيسية : $K_m < 0$

مسائل

الأقسام من 19-1 إلى 19-5

1 يحمل خط نقل للقدرة الكهربية تيارًا مقداره 32 A متجهًا نحو الغرب مباشرة في منطقة يكون فيها المجال المغناطيسي موازيًا لسطح الأرض ومتجهًا نحو الشمال مباشرة $B = 8.2 \times 10^{-4}$ T . أوجد مقدار واتجاه القوة التي يؤثر بها المجال على جزء من خط القدرة طوله 2.0 m .

2 يحمل موصل ما تيارًا مقداره 24 A إلى أعلى بدءًا من سطح الأرض . والمجال المغناطيسي للأرض في تلك المنطقة أفقي ويتجه نحو الشمال مباشرة وشدته 8.0×10^{-4} T . ما هو مقدار واتجاه القوة المؤثرة على جزء طوله 50 cm من الموصل ؟

3 احسب القوة المؤثرة على جزء طوله 1 m من سلك يحمل تيارًا شدته 6 A في منطقة ذات مجال مغناطيسي منتظم شدته 0.75 T ويتجه عموديًا على السلك .

4 يحمل موصل ما تيارًا شدته 12 A في اتجاه يصنع زاوية مقدارها $45°$ بالنسبة لاتجاه مجال مغناطيسي منتظم مقداره 0.5 T احسب مقدار القوة المؤثرة على جزء طوله 2.5 m من الموصل .

5 تستقر عروة دائرية من السلك ، نصف قطرها $r = 10.0$ cm فوق منضدة وتحمل تيارًا شدته 1.8 A . وتتواجد العروة في مجال مغناطيسي رأسي منتظم شدته 0.1 T ويتجه إلى أعلى . (أ) أوجد القوة الكلية المؤثرة على العروة من قبل المجال المغناطيسي . (ب) أوجد بالتقريب القوة المؤثرة على طول قدره 0.2 mm من العروة .

■ 6 احسب اتجاه ومقدار القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي للأرض على سلك طوله 120 m مشدود أفقيًا بين عمودين ويحمل تيارًا مقداره 80 A . مقدار متوسط المجال المغناطيسي للأرض في هذه المنطقة هو 4.0×10^{-5} T واتجاهه يميل بزاوية مقدارها $50°$ على اتجاه التيار .

■ 7 سلك أفقي يمتد في الاتجاه شرق ـ غرب ، وكانت كتلة المتر منه 0.18 g ويحمل تيارًا مقداره I . ويتواجد السلك في مجال مغناطيسي شدته 0.5 T ويتجه أفقيًا نحو الشمال . أوجد أدنى تيار يجعل القوة المغناطيسية تعادل وزن السلك .

■ 8 يتجه تيار شدته 15 A في سلك ما باتجاه المحور x الموجب ومتعامدًا مع اتجاه مجال مغناطيسي . ويتعرض السلك لقوة مغناطيسية مقدارها 0.18 N/m لوحدة الأطوال وتتجه في اتجاه y الموجب . أوجد اتجاه ومقدار المجال المغناطيسي في هذه المنطقة .

■ 9 قضيب موصل دقيق طوله 1 m وكتلته 24 g يحمل تيارًا مقداره 0.3 A . ما هي أدنى شدة للمجال المغناطيسي المطبق عموديا على القضيب والتي تجعله يطفو في الهواء دون دعامة ؟

10 يميل سلك في المستوى xy على محور x الموجب بزاوية مقدارها $30°$ ، ويحمل تيارًا شدته 3 A في اتجاه قيم x و y الموجبة . وقد طبق على السلك مجال مغناطيسي شدته 0.04 T . أوجد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على قطعة من السلك طولها 0.5 m إذا كان المجال متجهًا (أ) بامتداد محور x الموجب ، (ب) بامتداد محور y السالب و (جـ) بامتداد محور z الموجب .

11 يستقر سلك موصل دقيق في المستوى xy صانعًا زاوية مقدارها $24°$ مع الاتجاه الموجب للمحور y ، ويحمل تيارًا مقداره

6.0 A نحو قيم x و y السالبتين . وكان المجال المغناطيسي في المنطقة هو 0.04 T . أوجد مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على قطعة طولها 1 m من الموصل إذا كان المجال متجهًا على طول (أ) محور x السالب ؛ (ب) محور y السالب ، (جـ) محور z الموجب .

القسم 19-6

12 قذف بروتون في الاتجاه الموجب لمحور x بسرعة مقدارها 5.0×10^4 m/s . أوجد اتجاه ومقدار القوة المؤثرة عليه من جانب مجال مغناطيسي شدته 0.04 T إذا كان المجال يتجه في (أ) اتجاه محور y السالب ، (ب) اتجاه محور z السالب ، (جـ) اتجاه محور x السالب .

13 قذف إلكترون في الاتجاه الموجب لمحور y بسرعة مقدارها 6.0×10^5 m/s . أوجد اتجاه ومقدار القوة المؤثرة عليه من جانب مجال مغناطيسي شدته 0.005 T إذا كان المجال في (أ) اتجاه محور y السالب ، (ب) اتجاه محور x الموجب و (جـ) اتجاه محور z السالب .

14 يتحرك بروتون عموديًا على مجال مغناطيسي شدته 0.08 T . ما السرعة التي على البروتون التحرك بها ، إذا كانت القوة المغناطيسية المؤثرة عليه مقدارها 5.0×10^{-14} N ؟

15 يتعرض إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها 4.8×10^5 m/s عموديًا على مجال مغناطيسي لقوة مقدارها 7.2×10^{-11} N . ما هو مقدار المجال المغناطيسي ؟

16 يتحرك إلكترون في المستوى xy بسرعة مقدارها 4.0×10^5 m/s واتجاهها يصنع زاوية مقدارها $30°$ فوق المحور x الموجب . ثم طبق مجال مغناطيسي شدته 0.065 T على الإلكترون . أوجد اتجاه ومقدار القوة المغناطيسية التي يتعرض لها الإلكترون إذا كان اتجاه المجال هو اتجاه (أ) محور x السالب ، (ب) محور y الموجب ، (جـ) محور z الموجب .

17 يتحرك بروتون في المستوى xy بسرعة مقدارها 3.6×10^4 m/s في اتجاه يصنع زاوية مقدارها $60°$ فوق محور x الموجب . احسب مقدار واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على البروتون إذا كان المجال المغناطيسي 0.004 T متجهًا في اتجاه (أ) محور y السالب ، (ب) محور x السالب ، (جـ) محور z الموجب .

18 يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 6.0×10^7 m/s خلال مجال مغناطيسي شدته 1.6 T . ما هو مقدار الزاوية المحصورة بين سرعة البروتون واتجاه المجال المغناطيسي لو كان البروتون يتعرض لقوة مقدارها 1.3×10^{-11} N ؟

■ 19 يتحرك بروتون أفقيًا بسرعة مقدارها 4×10^6 m/s في اتجاه متعامد مع مجال مغناطيسي . (أ) ما هي شدة المجال المغناطيسي اللازمة لمعادلة وزن البروتون تمامًا وجعله يستمر في الحركة الأفقية ؟ (ب) أي اتجاه يجب على هذا المجال أن يوجد فيه ؟

■ 20 يتحرك بروتون عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم بسرعة مقدارها 2×10^6 m/s لعجلة (تسارع) مقدارها 3×10^{12} m/s² في الاتجاه السالب لمحور x في اللحظة التي تكون سرعته في الاتجاه الموجب للمحور z . أوجد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي .

■ 21 أعد المسألة السابقة بالنسبة للإلكترون .

■ 22 عجّل (سرّع) إلكترون في فرق للجهد مقداره 3000 V ثم دخل منطقة بها مجال مغناطيسي منتظم مقداره 1.5 T . ما هي (أ) أقصى ، (ب) أدنى قيمة للقوة التي يتعرض لها الإلكترون في المجال المغناطيسي ؟ ما هي قيم الزوايا المحصورة بين B وسرعة الإلكترون التي تكون عندها القوة عند حديها الأقصى والأدنى ؟

الأقسام من 7-19 إلى 9-19

23 يتحرك بروتون بسرعة مقدارها 4×10^5 m/s عموديًا على مجال مغناطيسي منتظم شدته 24 mT . صف المسار الذى يتحرك فيه البروتون بطريقة كمية* .

24 صف بطريقة كمية المسار الذى يتبعه إلكترون يتحرك بسرعة مقدارها 6×10^6 m/s عموديًا على مجال مغناطيسي شدته 2 mT .

25 يتحرك إلكترون فى مدار دائرى نصف قطره 1.2 m فى منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم . كم سيكون نصف قطر المدار لو أن شدة المجال المغناطيسى انخفضت إلى نصف القيمة الأصلية ؟

26 يتحرك أيون وحيد الشحنة الموجبة ، كتلته 4.56×10^{-27} kg فى اتجاه ضد عقارب الساعة فى المستوى xy فى مسار دائرى نصف قطره 4 cm بسرعة مقدارها 2×10^4 m/s . احسب مقدار واتجاه المجال المغناطيسى .

27 تنبعث جسيمات ألفا من مصدر مشع بسرعة مقدارها 1.66×10^7 m/s . ما هى شدة المجال المغناطيسى المتعامد مع حركة جسيمات ألفا والتى تجعلها تتحرك فى مسار دائرى نصف قطره 0.80 m ؟

(كتلة جسيم ألفا هى 6.64×10^{-27} kg وشحنته ضعف شحنة البروتون) .

▪ 28 عُجِّل أيون ثنائى الشحنة الموجبة $(q = +2e)$ وكتلته 6.2×10^{-26} kg خلال فرق للجهد مقداره 300 V ، ثم دخل منطقة مجال مغناطيسى شدته 0.5 T متعامدًا عليه . احسب نصف قطر المسار الدائرى للأيون فى ذلك المجال .

▪ 29 عُجِّل بروتون خلال فرق للجهد مقداره 300 kV ثم دخل مجالا مغناطيسيا منتظمًا شدته 0.4 T بحيث كانت سرعته متعامدة مع خطوط المجال . ما هو نصف قطر الدائرة التى يتحرك فيها البروتون ؟

▪ 30 يدخل بروتون مُعجَّل خلال فرق جهد مجهول إلى منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم شدته 0.06 T ومتعامدًا مع اتجاه سرعة البروتون . إذا كان البروتون يتحرك فى مسار دائرى نصف قطره 35 cm . فما هى طاقته بوحدات الإلكترون فولت ؟

▪ 31 يدخل جسيم مشحون بشحنة q ويتحرك بسرعة v منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم شدته B بحيث يكون متعامدا معه فيدور فى مسار دائرى نصف قطره r . إثبت أن طاقة حركة الجسيم يمكن كتابتها على الصورة $KE = q^2r^2B^2/2m$ ، حيث m هى كتلة الجسيم .

▪ 32 احسب نصف قطر المسار الدائرى لإلكترون طاقة حركته 1 ev ويتحرك عموديًا على مجال مغناطيسى شدته 0.4 T .

33 تتحرك حزمة من البروتونات بسرعة مقدارها 2×10^5 m/s فى خط مستقيم خلال مجالين متعامدين أحدهما كهربى والثانى مغناطيسى داخل جهاز انتقاء السرعة . ما هى شدة المجال المغناطيسى إذا كانت شدة المجال الكهربى 8×10^5 N/C ؟

▪ 34 تتحرك حزمة إلكترونات معينة فى خط مستقيم خلال منطقة تعامد مجالين أحدهما كهربى والثانى مغناطيسى فى جهاز انتقاء السرعة ، وكانت شدة المجال المغناطيسى فى المنطقة 0.04 T ، وكانت المسافة بين اللوحين 6 cm وفرق الجهد بينهما 120 V . أوجد (أ) سرعة الإلكترونات و (ب) نصف قطر الدائرة التى يتحرك فيها الإلكترون عندما يكون فرق الجهد بين اللوحين صفرًا .

▪ 35 عندما تتحرك حزمة بروتونات عموديًا على مجال مغناطيسى شدته 0.04 T فإنها تدور فى مدار دائرى نصف قطره 1m . ما هى شدة المجال الكهربى المتعامد مع كل من المجال المغناطيسى B وسرعة البروتونات v والتى تجعل البروتونات تتحرك فى خط مستقيم ؟

▪ 36 يستخدم فى جهاز انتقاء السرعة مغناطيس لإنشاء مجال مغناطيسى منتظم شدته 0.050 T وزوج من الألواح المعدنية المتوازية بينهما مسافة مقدارها 20 mm لإنشاء مجال كهربى متعامد مع المجال المغناطيسى . ما مقدار فرق الجهد الواجب تطبيقه على اللوحين حتى تمر أيونات وحيدة الشحنة الموجبة سرعتها 6×10^6 m/s من جهاز انتقاء السرعة ؟

---

* أى على صورة معادلة تحتوى على كميات فيزيائية .



شكل م 2–19

■ 37 عندما يمر جسيم سريع كالإلكترون خلال هيدروجين سائل فائق التسخين فإن خطًا من الفقاقيع يتكون على امتداد مسار الجسيم . ويبين الشكل م 2–19 مسارات عدة جسيمات في « غرفة الفقاعات » هذه . وترى المسارات وهى منحنية بسبب وجود مجال مغناطيسي متعامد مع الصفحة ويتجه إلى داخلها . فإذا كان مقدار هذا المجال 4.0 mT فهل يكون الجسيم الذي يغادر النقطة a متحركًا نحو اليمين موجبًا أم سالبًا ؟ فإذا اعتبرناه إلكترونًا ، فكم تكون سرعته تقريبًا ؟ (الآثار المرسومة بالحجم الطبيعي وتقع في مستوى الصفحة) .

■ 38 يبطئ الجسيم الذي يبدأ الحركة من النقطة b من سرعته كلما تحرك خلال الهيدروجين السائل (الشكل م 2–19) ولهذا يتحرك في مسار كالحلزون إلى الداخل . اعتبر نفس البيانات الواردة في المسألة السابقة . واعتبر أن الجسيم إلكترون ثم أوجد مقدار سرعته عند النقطة c .

■ 39 يترك أيون وحيد الشحنة الموجبة ، ويتحرك بسرعة مقدارها 5×10^5 m/s ، أثرًا حلزونيًا نصف قطره 8 mm في صورة فوتوغرافية في مستوى متعامد مع المجال المغناطيسي لغرفة فقاعات . والمجال المستخدم في هذه الغرفة مقداره 2 T . احسب كتلة الأيون .

القسمان 10–19 و 11–19

40 احسب شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 20 cm من سلك طويل مستقيم يحمل تيارًا مقداره 4 A .

41 يحمل سلك مستقيم طويل تيارًا مقداره 5 A . على أي بعد تكون شدة المجال الناشئة عن هذا التيار مساوية لمقدار شدة المجال المغناطيسي للأرض أو 5×10^{-5} T ؟

42 لدينا سلكان طويلان ومستقيمان ومتوازيان وتفصلهما مسافة مقدارها 20 cm . ويحمل كل من السلكين تيارًا مقداره 10 A . أوجد مقدار واتجاه المجال المغناطيسي عند نقطة تقع في منتصف المسافة بين السلكين ، إذا كان التياران (أ) في نفس الاتجاه و (ب) في اتجاهين متضادين .

■ 43 لدينا سلكان مستقيمان ومتوازيان تفصلهما مسافة مقدارها 30 cm ويحمل كل منهما تيارًا مقداره 20 A . أوجد مقدار واتجاه المغناطيسي عند نقطة تقع في مستوى السلكين على بعد 10 cm من أحد السلكين و 20 cm من الآخر إذا كان التياران (أ) في نفس الاتجاه و (ب) في اتجاهين متضادين .

■ 44 يحمل سلك طويل مستقيم تيارًا مقداره 6 A في الاتجاه الموجب لمحور x ، ويحمل سلك آخر تيارًا مسافة شدته 8 A في الاتجاه السالب لمحور y . أوجد مقدار واتجاه محصلة المجالين المغناطيسيين للسلكين عند النقطة $x = 6$ cm و $y = 8$ cm .

45 ما هو مقدار التيار في عروة تيار دائرية نصف قطرها 15 cm ، إذا كان المجال المغناطيسي عند مركز العروة يساوى مقدار شدة المجال المغناطيسي للأرض وهو 5×10^{-5} T ؟

46 وصل ملف قطره 40 cm ومكون من مائة لفة من السلك ببطارية قوتها 9 V والمقاومة الكلية للملف 1.8 Ω . أوجد شدة المجال المغناطيسي عند مركز الملف .

47 يتكون ملف لولبي طويل من 2000 لفة من السلك وطوله 30 cm . فإذا كان قطر الملف 2.4 cm ، أوجد المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي عندما يمر خلاله تيار مقداره 250 mA ؟

48 استخدم ملف لولبي طوله 50 cm ومكون من 1500 لفة لخلق مجال مغناطيسي شدته 0.2 T . ما شدة التيار المطلوبة ؟

■ 49 يمتد سلك مستقيم طويل يحمل تيارًا مقداره 50 A على محور ملف لولبي طويل مجاله المغناطيسي 4.0 mT . (أ) ما مقدار القوة المؤثرة على قطعة طولها 1.0 cm من السلك ؟ (ب) ما مقدار المجال المغناطيسي الكلي داخل الملف اللولبي على بعد 0.5 cm من محوره ؟

50 لدينا موصلان متوازيان والمسافة بينهما 8 cm ويحمل كل منهما تيارًا مقداره 5 A . أوجد القوة لوحدة الأطوال التي تؤثر على أحد الموصلين بواسطة الآخر عندما يكون التياران (أ) في نفس الاتجاه و (ب) في اتجاهين متضادين .

51 يتجاذب سلكان متوازيان بقوة لوحدة الأطوال مقدارها 2.0×10^{-3} N عندما تكون المسافة بينهما 2 cm . وإذا كان التيار في أحدهما هو 100 A . فما هي قيمة التيار في السلك الآخر ؟

القسم 19-12

52 يستقر ملف مسطح من السلك وبه 40 لفة فوق منضدة أفقية . ومساحة الملف $120\ cm^2$ ويحمل تيارًا مقداره 30 A . أوجد عزم الدوران المؤثر عليه بسبب وجود مجال مغناطيسي 80 mT إذا كانت خطوط المجال (أ) موازية لسطح المنضدة و (ب) متعامدًا على سطح المنضدة ، و (جـ) مائلة بزاوية 30° على الخط الأفقي . (د) ما هو العزم المغناطيسي للملف ؟

53 يستقر ملف مسطح من السلك ، مكون من 40 لفة قبالة الحائط الشمالي لغرفة ما . وكانت مساحة الملف $240\ cm^2$ ويحمل تيارًا مقداره 25 A . أوجد عزم الدوران المؤثر على الملف نتيجة مجال شدته 80 mT إذا كانت خطوط هذا المجال تتجه (أ) نحو الغرب ، (ب) نحو الجنوب ، (جـ) رأسيًا ، (د) في مستوى الخط وبزاوية مقدارها 60° مع الحائط الرأسي ، (هـ) ما هو العزم المغناطيسي للملف ؟

■ 54 علق ملف مستطيل به 600 لفة وأبعاده 5 cm في 6 cm في مجال مغناطيسي شدته 0.8 T . ما هو التيار المار في الملف إذا كان أقصى عزم دوران يؤثر به عليه المجال المغناطيسي هو 0.24 N.m ؟

القسم 19-13

55 تبلغ مقاومة حركة مقياس (جلفانومتر) 50 Ω ويعطي انحرافًا ملء التدريج عند تطبيق جهد مقداره 250 mV بين طرفيه . كيف يمكن تحويله إلى أميتر يقيس 3 A ؟

56 كيف يمكن تحويل الجهاز المذكور في المسألة 55 إلى فولتميتر يقيس 10 V ؟

57 ينحرف مؤشر حركة مقياس (جلفانومتر) ملء تدريجه إذا مر به تيار مقداره 0.010 A ومقاومة المقياس 100 Ω . كيف يمكن تحويله إلى أميتر يقيس 5 A ؟

مسائل إضافية

■ 58 تستقر عروة مربعة من السلك فوق منضدة أفقية وتحمل تيارًا مقداره I ثم طبق على الملف مجال مغناطيسي منتظم شدته B في اتجاه يصنع زاوية مقدارها θ مع الخط الأفقي . إثبت أن القوة الصافية المؤثرة على العروة بسبب المجال صفر .

■ 59 يلاحظ أن جسيمًا مشحونًا يتبع مسارًا دائريًا نصف قطره 8.3 cm في مستوى متعامد مع مجال مغناطيسي منتظم شدته 8.0 mT . وقد وجد من قياسات مستقلة أن كمية تحرك الجسيم هي 2.0×10^{-22} kg.m/s . أوجد مقدار شحنة الجسيم ؟

■■ 60 قذف إلكترون من نقطة أصل الإحداثيات بسرعة مقدارها 3×10^{6} m/s وبزاوية مقدارها 60° أعلى محور x . وكان هناك مجال مغناطيسي شدته 0.006 T ويتجه في اتجاه المحور x الموجب . صف مسار الإلكترون بطريقة كمية .

تلميح : حلل سرعة الإلكترون إلى مركبتين إحداهما موازية لمحور x والثانية عمودية عليه .

■■ 61 يخرج أيونان من فتحة مطياف الكتلة ويدخلان منطقة يكون المجال المغناطيسي فيها متعامدًا مع سرعتي الأيونين وشدته 0.4 T ، فإذا كان أحد الأيونين وحيد الشحنة والثاني ثنائي الشحنة وكتلة كل منها 6.6×10^{-27} kg ويتحركان

بسرعة مقدارها 2×10^6 m/s أوجد (أ) نصف قطر المسار الدائرى لكل من الأيونين فى المجال المغناطيسى و (ب) والمسافة التى تفصلهما عندما يكمل كلٌ منهما نصف دائرة ويصطدمان بلوح فوتوغرافى .

62 ملف لولبى به 50 لفة لكل سنتيمتر من طوله ويحمل تيارًا مقداره 10 A . وقد قذف بروتون من نقطة على محور الملف اللولبى بسرعة مقدارها 4×10^5 m/s وبزاوية مقدارها $20°$ مع المحور . صف المسار الذى يتبعه البروتون بطريقة كمية .
تلميح : حلل السرعة الابتدائية للبروتون إلى مركبتين أحداهما موازية والأخرى متعامدة مع المحور .

63 علق سلك طويل مستقيم طوله 1.6 m ويزن 0.1 N لكل متر من طوله فوق سلك آخر مثبت بحيث كان موازيًا له . ويحمل التيار العلوى تيارًا مقداره 32 A والسفلى 65 A . فإذا كان السلك العلوى يستقر فى مكانه بفضل التنافر المغناطيسى مع السلك السفلى فما مقدار المسافة بين السلكين ؟

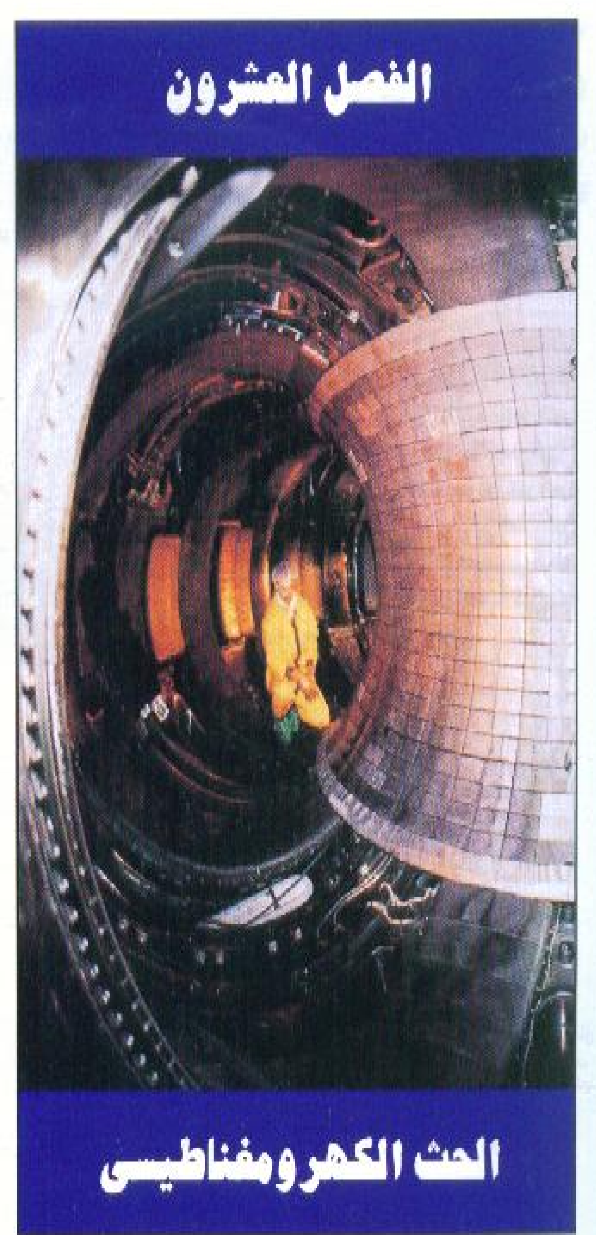
64 يستقر ملف مربع من السلك ، طول ضلعه 15 cm وبه 50 لفة وكتلته 100 g فوق منضدة مسطحًا . ويؤثر على الملف مجال مغناطيسى أفقى شدته 0.048 T وموازٍ لأحد الأضلاع . ما هو مقدار التيار المار فى الملف لكى يرتفع أحد الأضلاع عن سطح المنضدة ؟

65 يحتوى ملف دائرى من السلك قطره 20 cm على 40 لفة وكتلته 50 g . ويستقر الملف مسطحًا فوق منضدة ويتعرض لمجال مغناطيسى شدته 60 mT ويصنع زاوية مقدارها $30°$ مع الخط الرأسى . ما مقدار التيار المار فى الملف إذا أريد لجزء من الملف أن يرتفع عن المنضدة ؟

66 تبلغ قيمة المجال المغناطيسى المنتظم داخل ملف لولبى طويل B . وكان نصف القطر الداخلى للملف هو R واتجاه لمجال المغناطيسى موازيًا للمحور . ما هى أقصى سرعة يقذف بها إلكترون قطريًا من على المحور ، إذا كان عليه تجنب الاصطدام بالسطح الداخلى للملف اللولبى ؟

67 وزعت شحنة بإنتظام على سطح أنبوبة مجوفة مستقيمة ومصنوعة من البلاستيك وكانت الشحنة لوحدة الأطوال هى Q والأنبوبة طويلة جدًا . فإذا كانت الأنبوبة تدور حول محورها بتردد قيمته f ، فما مقدار المجال المغناطيسى داخل الأنبوبة والناشئ عن حركة الشحنات على سطحها ؟

68 يتبع إلكترون مسارًا دائريًا نصف قطره 4 cm وهو بداخل ملف لولبى . وكان الإلكترون متحركًا بسرعة مقدارها 2×10^4 m/s . والمجال المغناطيسى للملف اللولبى متعامدًا على مستوى مسار الإلكترون . أوجد (أ) شدة المجال المغناطيسى داخل الملف اللولبى و (ب) التيار المار فى الملف اللولبى لو كان يحتوى على 30 لفة لكل سنتيمتر من طوله .



لقد قامت الثورة الصناعية التى غيرت وجه العالم منذ أكثر من قرن من الزمن ، على ثلاثة إنجازات علمية رئيسية : اختراع الآلة البخارية استنادًا إلى الديناميكا الحرارية ، واكتشاف أن القوة التى تدير المحركات تقوم على التفاعل بين التيارات الكهربية مع المجالات المغناطيسية ، واكتشاف أن التيارات يمكن إنتاجها من المجالات المغناطيسية المتغيرة . ولقد ناقشنا الإنجازين الأولين . وسنقوم بدراسة الإنجاز الثالث فى هذا الفصل .

20-1 القوة الدافعة الكهربية المستحثة ـ ق.د.ك المستحثة

لقد تم اكتشاف أن التيارات الكهربية تولد مجالات مغناطيسية على يدى الفيزيائى الدنماركى هانز كريستيان أورستيد عام 1820 . وكما يحدث عادة فى العلم فإن هذا الجانب الجديد الذى تم اكتشافه للطبيعة أدى إلى بحوث غزيرة فى الظواهر المرتبطة به . وقد سار فى أحد دروب العلم التجريبى أولئك الذين حاولوا الإجابة على السؤال التالى : « إذا كانت التيارات تنتج مجالات مغناطيسية ، أفلا يمكن للمجالات المغناطيسية أن تنتج تيارات ؟ » ومضت عشر سنين قبل أن تظهر الإجابة التأكيدية على هذا السؤال على يدى مايكل فاراداى (1791 ـ 1867) فى إنجلترا ، وبشكل مستقل أيضًا على يدى جوزيف هنرى (1797 ـ 1878) بالولايات المتحدة* . وسنقوم الآن بعرض تجربة توضح هذا التأثير بشكل جلى .

* نشر عمل هنرى الذى أجراه فى سرية نسبية فى ألبانى بنيويورك فى الولايات المتحدة الأمريكية فقط وعرف به عدد قليل من الناس . وهكذا فإن تجاربه لم يكن لها سوى تأثير طفيف على التقدم العلمى فى ذلك الوقت .

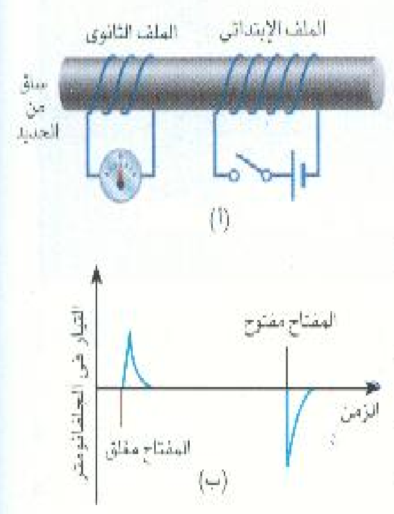




عرض مؤثر للتيار المستحث . (أ) ملــف يتصل به بصيلة وميض كالتى تستعمل فــى التصوير وهو بداخل مجال مغناطيسى قوى . (ب) عندما يسحب الملف بسرعة كبيرة من المجال المغناطيسى ، فإن التغير المفــاجئ فى الفيض (التدفق) المغناطيســى الــذى يتخلل الملف يستحث قوة دافعــة كهربيــة كافية لجعل البصيلة تومض .

تستخدم فى هذه التجربة معدات بسيطة كالمبينة فى الشكل 1-20 (أ) ، حيث نرى دائرتين بسيطتين ، والتوصيل فى كل منهما على التوالى . تتكون الأولى من بطاريــة ومفتاح تتصل معًا على التوالى بواسطة سلك طويل ملفوف حول قضيب من الحديد المطـاوع . ويطلق على هذا الملف **ملفًا ابتدائيًا** لأنه يتصل بالبطارية . أما الثانية فيلتـف بـها سـلك مستقل حول القضيب نفسه ويتصل على التوالى بجلفانومتر (يرمز له بالرمز (G)) ولكنها لا تحتوى على أية بطارية وهذا الملف هو ما يسمى **بالملف الثانوى** .

وقد يظن أحد أن التيار خلال الثانوى سيكون صفرًا على الـدوام بمـا أن دائرتـه لا تحتوى على بطارية . . على أن حقيقة ساطعة تتجلى إذا أغلق المفتـاح أو فتح فجـأ فى الدائرة الابتدائية . ففى هذه اللحظة ذاتها سينحرف مؤشر الجلفانومـتر فجـأة ثـم يعود مرة أخرى إلى الصفر . وبعبارة أخرى فإن تيارًا يستحث فى دائرة الملف الثانوى للحظة قصيرة . ويبدو الأمر كما لو كـان بـالدائرة الثانويـة بطاريـة (أى مصدر للقـوة الدافعة الكهربية) لا يستمر وجودها إلا وقتًا قصـيرًا يتم فيـه فتـح أو قفـل المفتـاح . ويقال فى هذه الحالة أن **قوة دافعة كهربية مستحثة** قد وجدت فـى الملـف الثـانوى خلال تلك اللحظة .

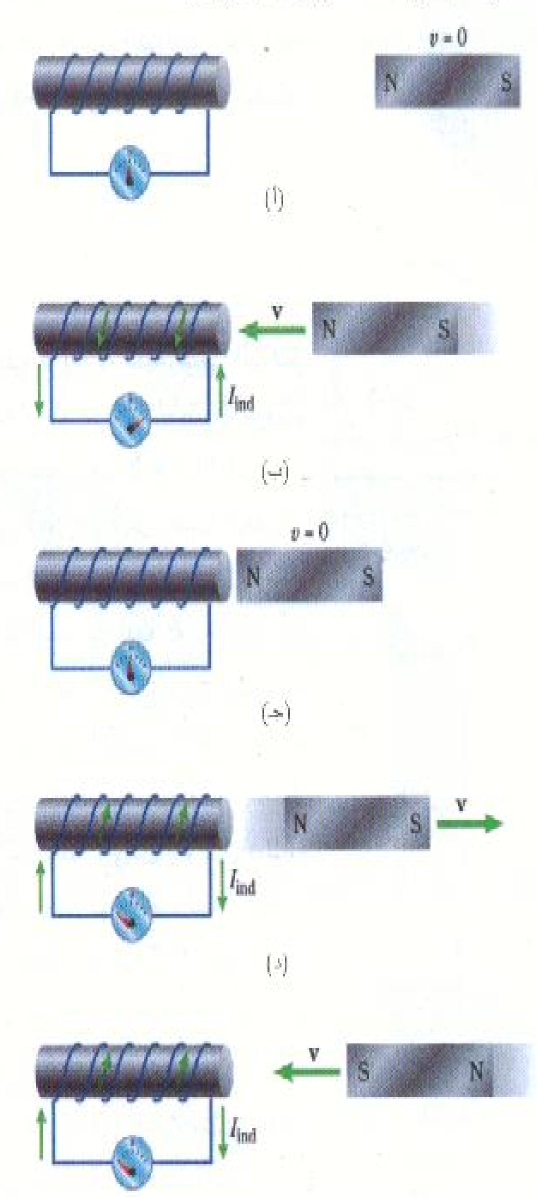


ويوضح الشكل 1-20 (ب) سمة أخرى للتيار والقوة الدافعـة الكهربيـة المستحثين : حيث يسرى التيار المار فى فترة قصيرة فى اتجاه معـين عنـد قفـل المفتـاح ويسـرى فـى الاتجاه المضاد عندما يفتح . ويدل هذا على أن اتجاه القـوة الدافعـة الكهربيـة المستحثة يعتمد على ما إذا كان التيار فى الملف الابتدائى فى تزايد أم فى تناقص .

شكل 1-20 :
يتواجد تيار مستحث (تأثيرى) فى الملــف الثانوى فقط عندما يكون التيار المار فــى الملف الابتدائى فى حالة تغـير . وتكـون نبضات التيار فى الواقع أقصر كثيرًا عمـا هو مبين فى (ب) .

أما الشكل 2-20 فيوضح تجربة ثانية تشبه الأولى إلى حد ما ، حيث تحتوى الدائرة على قضيب مغناطيسى وملف متصل على التوالى مع جلفانومتر وعندما يستقر المغنـاطيس ساكنًا إلى جوار الملف كما فـى (أ) و (جـ) فلـن يكون هناك تيار فى الملف . أما إذا

تحرك المغناطيس بالنسبة للملف فإن تيارًا يسرى فى الملف كما هو مبين فى الأجزاء (ب) ، (د) ، (هـ) ، وكما نرى فإن قوة دافعة كهربية مستحثة تظهر فى الملف عندما يكون الملف والمغناطيس فى حركة نسبية إزاء بعضهما البعض فقط . **لا تتواجد قوة دافعة كهربية مستحثة إذا لم تكن هناك ظروف متغيرة .**



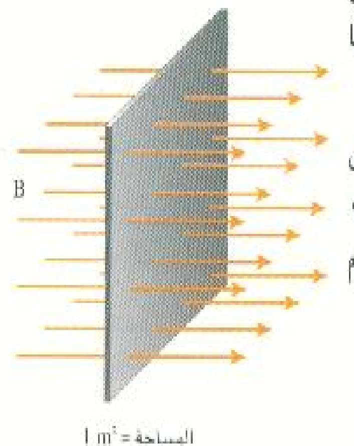
شكل 2–20:
لا يُستحث تيار فى الملف إلا عندما يتحرك المغناطيس بالنسبة للملف . ويعتمد اتجاه التيار على اتجاه حركة المغناطيس وعلى اتجاه مجال المغناطيس .

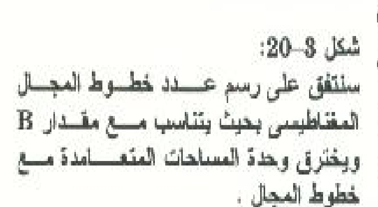
ويمكننا تحليل هذا الأثر بطريقتين . فقد نلجأ إلى حقيقة أن شحنة تتحرك فى مجال مغناطيسى لابد وأن تتعرض لقوة . وعلى الرغم من أن الشكل 2–20 يبين أن المغناطيس هو الذى يتحرك ، إلا أن نفس الشىء تمامًا يحدث إذا ظل المغناطيس ثابتًا وكان المتحرك هو الملف* . ولننظر ماذا يحدث عندما يتحرك الملف باتجاه المغناطيس . إن الشحنات

* يعتبر هذا مثالاً على حقيقة أن الحركة هى كمية نسبية . وعندما تتم الحركة النسبية بين جسمين ، فإن تأثير أحدهما على الآخر لا يكون دالة سوى فى الحركة النسبية . وليس هناك فرق بين أى من الجسمين هو الذى يظل ساكنًا وأيهما يتحرك . وسوف يقال أكثر من هذا حول الموضوع فى الفصل السادس والعشرين عند مناقشة النظرية النسبية .

الحرة داخل السلك ، تتعرض لقوة $qvB_{\perp}$ عندما تتحرك فى المجال المغناطيسى للمغناطيس ، كما تنص المعادلة 2-19 . وتتدفق الشحنات تحت تأثير هذه القوة مما يؤدى إلى ظهور التيار المستحث .

ويوضح هذا التناول كيف ترتبط القوة الدافعة الكهربية المستحثة بالظواهر التى درسناها بالفعل ، وسنعود من وقت لآخر إلى استخدام هذا التناول للموقف . على أنه فى معظم الحالات العملية يتم استخدام تناول آخر أكثر فائدة ؛ إذ ينطوى على مفهوم التدفق (الفيض) المغناطيسى كما سنرى فى الأقسام القادمة .

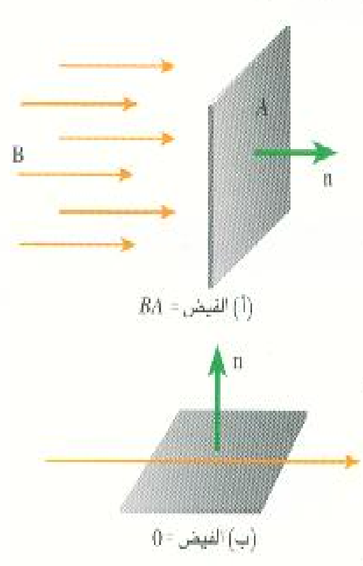



شكل 3-20:
سنتفق على رسم عدد خطوط المجال المغناطيسى بحيث يتناسب مع مقدار B ويخترق وحدة المساحات المتعامدة مع خطوط المجال .

2-20 التدفق المغناطيسى (الفيض)

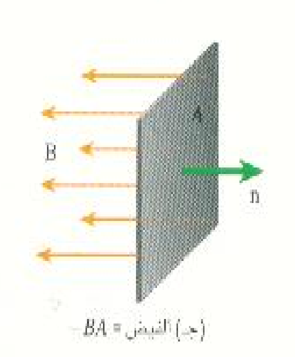
لقد فسر فاراداى القوة الدافعة الكهربية المستحثة فى ملف ما بدلالة كمية تسمى **التدفق المغناطيسى** . ومن أجل هذا ، ابتكر قاعدة تحدد كيفية رسم خريطة لخطوط المجال المغناطيسى . فإذا كان للمجال المغناطيسى فى منطقة ما مقدار هو B فإننا نمثل هذا المقدار بيانيًا بأن نتفق على رسم خطوط المجال وهى على أبعاد معينة من بعضها البعض ، وأن تمثل المجالات الأضعف بخطوط متباعدة عن بعضها البعض بشكل أكبر . وبعبارة أخرى يمكن القول بأن **كثافة** خطوط المجال فى الرسم تتناسب مع قيمة B .

ويمكننا قياس كثافة الخطوط هذه لو أقمنا سطحًا متعامدًا مع الخطوط ثم قمنا بعد الخطوط التى تخترق وحدة المساحات من هذا السطح ؛ كما فى الشكل 3-20 ، حيث يمر ستة عشر خطًا من خطوط المجال خلال مساحة قدرها $1\ m^2$. وقد نود أن نختار كثافة الخطوط هذه لتمثل شدة مجال مغناطيسى ولتكن $1\ T$ مثلاً . ومن ثم فإن منطقة تمر بوحدة المساحات بها ثمانية خطوط ستمثل شدة مجال مقدارها النصف أى $0.5\ T$ ، أما المنطقة التى بها 32 خطًا فى المتر المربع فإنها تمثل مجالا شدته $2\ T$ وهكذا . أى أن التمثيل البيانى للمجال المغناطيسى هو أن B تتناسب مع كثافة خطوط الفيض ، أو مع عدد خطوط المجال التى تعبر مساحة ما مقسوما على تلك المساحة .



ويؤدى هذا التفسير إلى اعتبار أن عدد الخطوط المارة خلال المسافة A يمثل المقدار $B_{\perp}A$. وهذا هو ما يسمى **الفيض (التدفق) المغناطيسى** خلال A ، وعادة ما يعبر عنه بالرمز Φ :

$$B_{\perp}A = \Phi = \text{A الفيض المغناطيسى خلال} \qquad (20\text{-}1)$$



ومن الواضح أن وحدات SI للفيض المغناطيسى ستكون $T.m^2$ وتختصر هذه الوحدة فى اسم خاص هو الوبر **weber (Wb)** . وهكذا .

$$1\ Wb = 1\ T.m^2$$

أو بدلاً من ذلك



$$1\ T = 1\ Wb/m^2$$

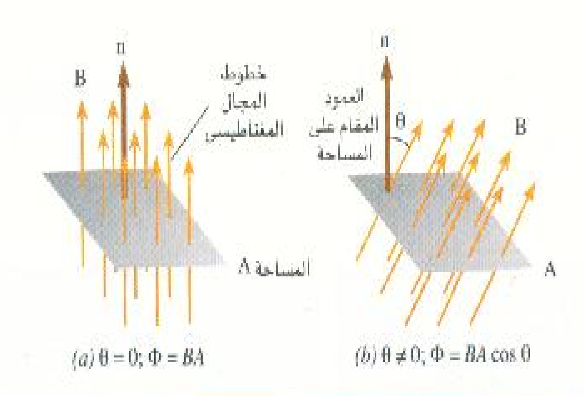
شكل 4-20:
يعتمد الفيض خلال مساحة ما على الاتجاهات النسبية بين المساحة وخطوط المجال .

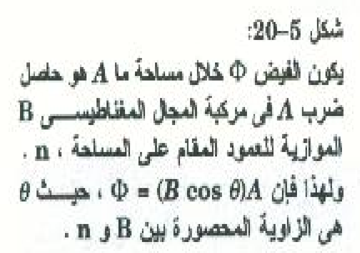
وبسبب هذا التعبير الأخير فإن المجال المغناطيسى B يشار إليه أحيانًا بأنه **كثافة الفيض** (التدفق) .

ومن المهم جدا تذكر أننا اعتبرنا **B** متعامدًا مع مستوى المساحة A فى الشكل 4–20 (أ) فإذا أدرنا المساحة A كما فى الشكل 4–20 (ب) فإنه لن تمر خلالها أية خطوط للمجال ولهذا فإن $\Phi = 0$. وقد يكون الفيض سالبًا كذلك كما هو موضح فى الشكل 4–20 (جـ) حيث يتخذ كل من **B** و **n** اتجاهين متضادين وهناك طريقة بسيطة لكتابة هذه العلاقة بين Φ والاتجاه وذلك بوصف اتجاه **العمود n** ، المقام على المساحة A . والمركبة $B_{\perp} = B\cos\theta$ هى مركبة **B** الموازية للعمود . وعلى هذا تكون المعادلة العامة للفيض المغناطيسى هى :

$$\Phi = (B\cos\theta)A = BA\cos\theta \qquad (20\text{–}2)$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين **B** و **n** .





شكل 5–20:
يكون الفيض Φ خلال مساحة ما A هو حاصل ضرب A فى مركبة المجال المغناطيسى B الموازية للعمود المقام على المساحة ، n . ولهذا فإن $\Phi = (B\cos\theta)A$ ، حيث θ هى الزاوية المحصورة بين B و n .

مثال 1-20

تبلغ قيمة المجال المغناطيسى 4.0×10^{-5} T فى إحدى الغرف ، وتميل بزاوية مقدارها 70° أسفل الخط الأفقى . أوجد قيمة الفيض خلال سطح منضدة مساحتها $400\ cm \times 80\ cm$ موضوعة فى الغرفة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد قيمة الفيض ؟

الإجابة : إنها شدة المجال B والمساحة A والزاوية المحصورة بين **B** والعمود المقام على المساحة : $\Phi = BA\cos\theta$.

سؤال : ما هى الزاوية الصحيحة التى تستخدم ؟

الإجابة : العمود المقام على سطح المنضدة يكون رأسيًا . وحيث أن **B** يتجه بزاوية 70° أسفل الخط الأفقى ، فإنه يكون على زاوية 20° من الرأسى (ويتجه إلى أسفل) .

الحل والمناقشة : المساحة A هى

$$A = (4.00\ m)(0.80\ m) = 3.2\ m^2$$

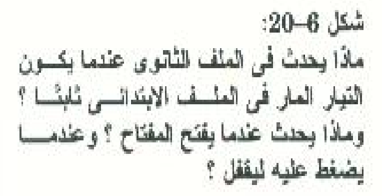
ويكون الفيض هو

$$\Phi = (4.0 \times 10^{-5}\ T)\ (3.2\ m^2)\cos 20^\circ = 1.2 \times 10^{-4}\ Wb$$

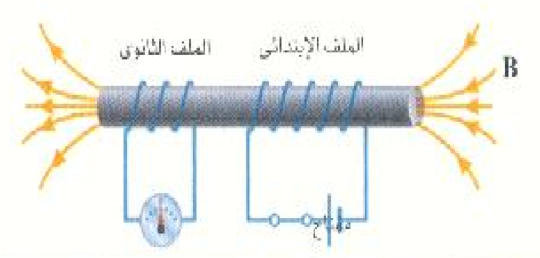
تمرين : ما مقدار الفيض الذى يمر خلال الحائط الشمالى للغرفة والذى مساحته $18\ m^2$ ، إذا لم يكن للمجال مركبة فى الاتجاه غرب شرق ؟ **الإجابة :** 2.1×10^{-4} Wb .

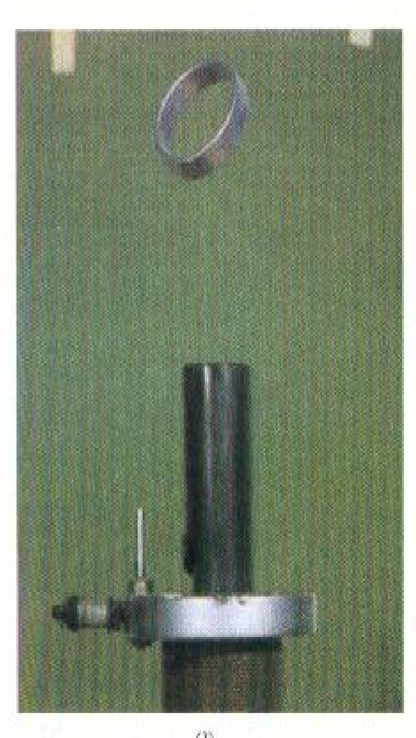
20-3 قانون فاراداى وقانون لنز

أجرى فاراداى العديد من التجارب كتلك الموضحة في الشكلين 1-20 ، 2-20 ، ثم استنتج بعدها أن القوة الدافعة الكهربية المستحثة تتواجد فقط عندما يتغير الفيض المغناطيسى الذى يتخلل الملف . وكمثال آخر ، سنفحص التجربة الموضحة فى الشكل 6-20 .



شكل 6-20:
ماذا يحدث فى الملف الثانوى عندما يكون التيار المار فى الملف الابتدائى ثابتًا ؟ وماذا يحدث عندما يفتح المفتاح ؟ وعندما يضغط عليه ليقفل ؟





(أ)



(ب)



(جـ)

أثر من آثار الحث المغناطيسى . (أ) تستقر حلقة صغيرة من الألمونيوم فوق طوق أكبر من الألمونيوم أعلى ملف لولبى . والعمود الأسود فى الصورة مصنوع من مادة فرومغناطيسية . عند وصول التيار إلى الملف فإن مجاله المغناطيسى المتغير يخلق فيضًا مغناطيسيًا متغيرًا فى حلقة الألمونيوم . وتكون النتيجة المعارضة لهذه الزيادة فى الفيض ، أن يستحث تيار فى الحلقة من شأنه المرور فى اتجاه عكس اتجاه التيار فى الملف اللولبى . وفى (ب) و (جـ) يبدو تأثير قوة التنافر بين هذين التيارين المتعاكسين .

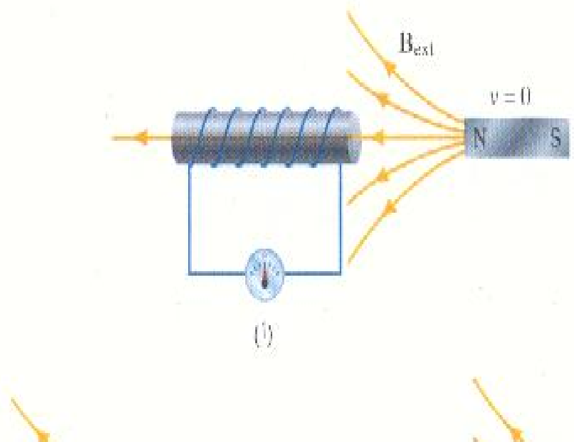
عندما يضغط المفتاح ليقفل فإن التيار المار فى الملف الابتدائى يخلق المجال المغناطيسى المبين بالشكل . وبما أن خطوط المجال ستتخذ القضيب الحديدى مسارًا ، فإن فيضًا كبيرًا يمر خلال الملف الثانوى . أما إذا جذب المفتاح ليفتح فإن هذا الفيض يتناقص حتى يصبح صفرًا لأن التيار الذى يتسبب فيه قد توقف . أى أن القوة الدافعة الكهربية المستحثة فى الملف الثانوى لا توجد بالفعل إلا عند حدوث هذا **التغير** فى الفيض ؛ ولن تكون هناك أية قوة دافعة مستحثة عندما لا يكون الفيض فى حالة تغير . وتدل نبضة التيار المسجلة فى الجلفانومتر على وجود قوة دافعة كهربية مستحثة فى الملف الثانوى . (الشكل 6-20) .

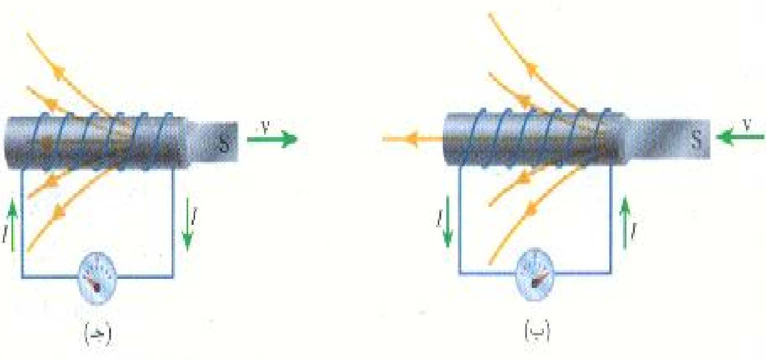
وبالمثل ، فإننا لو بدأنا التجربة والمفتاح مفتوح ، فإن الفيض خلال الملف الثانوى يكون صفرًا . فإذا ضغط المفتاح ليقفل فستمر برهة قصيرة من الزمن يتنامى فيها الفيض حتى يصل إلى قيمته المناظرة لحالة الاستقرار . ومرة أخرى يُرصد تيار فى الملف الثانوى أثناء هذه البرهة . ويكون التيار هذه المرة فى عكس اتجاه التيار الذى مر عندما جذب المفتاح ليفتح . وبمجرد أن يصل التيار إلى القيمة المناظرة لحالة الاستقرار فإن القوة الدافعة الكهربية فى الملف الثانوى تختفى . لأن الفيض المغناطيسى الذى يتخلل الملف الثانوى قد صار مرة أخرى ثابتًا لا يتغير .

وتؤكد التجربة المبينة فى الشكل 7-20 استنتاج فاراداى . فيلاحظ أنه لكون خطوط المجال أكثر كثافة بالقرب من المغناطيس ، لذا ينمو الفيض المتخلل للملف مع اقتراب المغناطيس أكثر فأكثر . ويظل هناك تيار فى الملف طالما ظل المغناطيس متحركًا نحو الملف وعندما يصبح المغناطيس ساكنًا فلن يكون هناك تغير فى الفيض وبالتالى لا يستحث تيار فى الملف . وعندما يسحب الملف كما فى الشكل 7-20 فإن الفيض يأخذ فى **التناقص** . ويسجل الجلفانومتر تيارًا فى الاتجاه المضاد . ويدل اتجاها التيار على أن قطبية القوة الدافعة الكهربية المستحثة عند اقتراب المغناطيس ؛ تكون عكس تلك التى تحدث عند تراجع المغناطيس وتباعده . وهذا ما يوضحه الشكل 7-20 (ب) و (جـ) .

ونستطيع الآن أن نقدم صياغة كمية لنتائج فاراداى . نفترض أن الفيض المغناطيسى الذى يتخلل ملفًا به عدد N عروة ؛ يتغير من Φ_1 إلى Φ_2 فى زمن قدره Δt . وقد وجد فاراداى أن متوسط القوة الدافعة الكهربية المستحثة فى الملف خلال هذا التغير هى

$$\text{(20-3)} \qquad \overline{\text{القوة الدافعة الكهربية (ق.د.ك)}} = N\frac{(\Phi_2-\Phi_1)}{\Delta t} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$





شكل 7-20:
عندما يتحرك المغناطيس كما فى الجزء (ب) ، (جـ) فإن التيار المستحث يتجه كما فى الرسم . لماذا ؟

وهو ما يطلق عليه **قانون فاراداى للحث المغناطيسى** . وهو أحد أكثر مبادئ الكهربية

والمغناطيسية أهمية ، بل ويعتبر أساس عمل المولدات الكهربائية والمحركات وعدد كبير من الأجهزة المهمة .

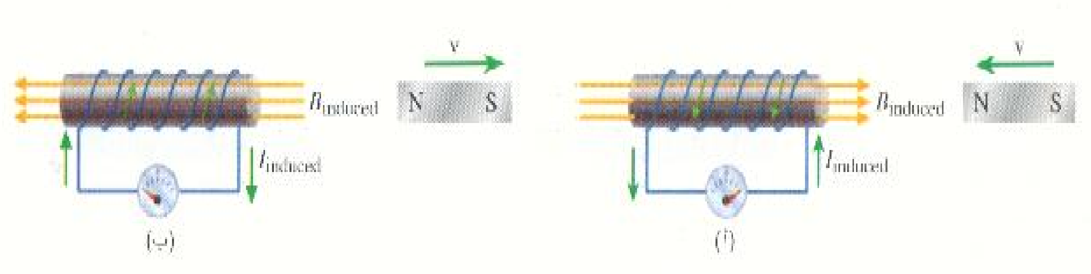
وكما هو شأن أى تيار آخر فإن التيار المستحث ينتج مجالاً مغناطيسيًا خاصًا به . والشكل 20-8 يبين اتجاهات هذا المجال المستحث (B_{ind}) والناشئ من تحركات المغناطيسين المرسومين في الأشكال (ب) و (جـ) وعليك التأكد من أن الاتجاهات المبينة للمجال (B_{ind}) فى الشكل 20-8 تتفق مع قاعدة اليد اليمنى .

ومن المهم عند هذه النقطة أن ندرك أن الفيض المغناطيسى Φ يمكن أن يكون موجبًا أو سالبًا ، اعتمادًا على ما إذا كانت الزاوية θ المحصورة بين **B** و **n** تقع بين $0°$ و $90°$ (الشكل 20-4 أ يبين زاوية مقدارها $0°$) أو بين $90°$ و $180°$ (الشكل 20-4 جـ يبين زاوية مقدارها $180°$) . وبعبارة أخرى ، إذا انعكس اتجاه المجال المغناطيسى خلال مساحة ما فإن إشارة Φ تنعكس هى الأخرى . وفيما يأتى من مناقشة سنعتبر أن العمود المقام على مستوى الملف والمغناطيس الخارجي يقعان بطول محور x . وعلى هذا يكون الفيض موجبًا إذا كان للمجال المغناطيسى مركبة فى الاتجاه $+x$ ، وسالبًا عندما تكون المركبة فى الاتجاه $-x$.

وفى الحالات التى يغطيها الشكلان 20-7 ، 20-8 ، هناك **مصدران** للمجال المغناطيسى ومن ثم مصدران للفيض المغناطيسى الذى يتخلل الملف فمصدر الفيض Φ_{ext} هو مجال المغناطيس (B_{ext}) ، ومصدر الفيض Φ_{int} هو المجال المغناطيسى (B_{int}) الذى ينتجه التيار المستحث . يلاحظ فى الشكل 20-7 (ب) أن المجال B_{ext} يتجه نحو اليسار ولذا يكون سالبًا . وعندما يقترب فإن مزيدًا من خطوط B_{ext} تخترق مستوى الملف ، ومن ثم يزداد هذا الفيض السالب .

أما فى الشكل 20-7 (جـ) فإن المجال المغناطيسى الخارجي الذى يخلق الفيض Φ_{ext} يتجه أيضًا نحو اليسار ؛ ولذلك يكون Φ_{ext} سالبًا هو الآخر . إلا أن هذا الفيض السالب خلال الملف يتناقص لأن المغناطيس يتحرك مبتعدًا عن الملف . ويوضح الشكل 20-8 (ب) أن المجال المغناطيسى المستحث B_{ind} الناشئ عن التيار المستحث سيتجه الآن نحو اليسار ، لذا فإن Φ_{ind} الناتج عن هذا المجال يكون سالبًا . وهذا الفيض السالب Φ_{ind} يعوّض بعضًا من الفيض Φ_{ext} الذى أزيل عند تراجع المغناطيس . وهكذا - ومرة أخرى - فإن الفيض المستحث يعارض التغير الحادث فى الفيض الخارجي .

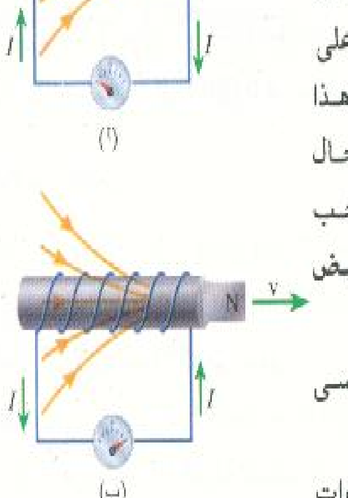
شكل 20-8:
يخلق التيار المستحث فيضًا مغناطيسيًا يتخلل الملف ، بحيث يعارض التغير فى الفيض الناتج عن مجال خارجى متغير (ليس مبينًا هنا) . (أ) عند اقتراب القطب الشمالى من الملف ، كما فى الشكل 20-7 (ب) . (ب) بتراجع القطب الشمالى كما فى الشكل 20-7 (جـ) .



والأمر المشترك بين هاتين الحالتين هو أن تيارًا يُستحث فى أى اتجاه من شأنه خلق فيض مستحث يعارض التغير فى الفيض الخارجى الناشئ عن B_{ext} . أى أن ، **الفيض المستحث يميل إلى المحافظة على ظروف الفيض الأصلى** . وقد اتضح أن هذه الملاحظة

تعتبر مبدأً عامًا وتسمى **قانون لنز** :

يستحدث التغير في الفيض المغناطيسي الخارجي Φ_{ext} خلال الملف قوة دافعة كهربية (ق.د.ك) في الملف . ويكون اتجاه التيار الذي تحدثه هذه القوة الدافعة الكهربية بحيث ينتج المجال المغناطيسي الذي يخلقه B_{ind} فيضًا Φ_{ind} يعارض التغير الحادث في Φ_{ext} .



وكمثال إضافي ، افترض إنك قربت قطبًا **جنوبيًا** لمغناطيس من ملف كما في الشكل 20-9 (أ) . وفي هذه الحالة يتجه المجال B_{ext} **نحو اليمين** ، ويكون Φ_{ext} خلال الملف موجبًا . ويتزايد كلما اقترب المغناطيس . وإذا طبقت قاعدة لنز فستكون قادرًا على إثبات أن اتجاه I_{ind} الآن سيكون كما هو موضح في الشكل 8-20 (ب) . ويستحث هذا التيار مجالاً مغناطيسيًا B_{ind} يتجه إلى اليسار ولذا فإن Φ_{ind} الذي يخلقه هذا المجال يكون سالبًا . ويلغي هذا الفيض السالب بعضًا من الزيادة الحادثة في Φ_{ext} الموجب والتي تحدث نتيجة حركة المغناطيس . ومرة أخرى ، وكما ينبغي ، **فإن الفيض المستحث يعارض التغير الحادث في الفيض الخارجي .**

ولابد أن تحليلاً موازيًا للشكل 9-20 (ب) سوف يقنعك أن المجال المغناطيسي المستحث يتجه في هذه الحالة كما هو مبين في الشكل 8-20 (أ) .

ويمكن تبسيط استخدام قانون لنز لإيجاد اتجاه التيار المستحث لو أنك تذكرت الخطوات التالية :

شكل 9-20:
يستحث قطب مغناطيسي جنوبي يقترب أو يتراجع عن ملف تيارات تعاكس تلك التي تحدث بالنسبة لقطب شمالي . قارن الرسومات الموضحة بالشكل بتلك التي في الأشكال 7-20 (ب) ، (جـ) .

1 عين اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي المار خلال العروة . فإذا ما عرفت اتجاه B_{ext} فإنك ستعرف إشارة Φ_{ext} . فإذا كانت مركبة B_{ext} في اتجاه x الموجب فيمكنك اعتبار Φ_{ext} موجبًا ، وبالنسبة لمركبة B_{ext} في الاتجاه x السالب . اعتبر Φ_{ext} سالبًا .

2 حدد ما إذا كان B_{ext} في تناقص أو تزايد .

3 حدد الإشارة التي لابد أن تكون لدى Φ_{ind} حتى يعارض التغير في Φ_{ext} الناشئ عن التغير الحادث في B_{ext} . (تذكر أنه ليس من الضروري أن يعارض الفيض المستحث الفيض الخارجي ولكنه دائمًا ما يعارض **التغيرات** في ذلك الفيض) .

4 حدد الاتجاه الذي على B_{ind} أن يتخذه لكي ينتج Φ_{ind} الذي له الإشارة المحددة في الخطوة 3 .

5 حدد (من قاعدة اليد اليمنى) الاتجاه الذي يجب أن يتخذه التيار المستحث لكي يحدث اتجاه B_{ind} المحدد في الخطوة 4 .

ولقد ناقشنا حتى الآن - التغيرات الناتجة عن التغيرات في المجال المغناطيسي المار خلال الملف . على أنه لابد من تذكر أن الفيض يعتمد أيضًا على مساحة الملف واتجاهه بالنسبة للمجال . وهكذا فإن الفيض خلال الملف يمكن أن يتغير بإحدى الوسائل التالية :

1 بتغيرات في B .

2 بتغيرات في المساحة A .

3 بتغيرات في الزاوية θ .

وقد ثبت أن قانونى فاراداى ولنز صالحان بغض النظر عن الكيفية التى يتغير بـها الفيـض . وسـوف نطبق ـ فـى فصول تالية ـ هـذين القانونين على حالات يتغير فيها كل مـن المساحة والاتجاه .

مثال 2-20

لدينا ملف لولبى يحتوى على 100 لفة ومساحة مقطعه المستعرض $4.0\ cm^2$. وقد نقل الملف فجأة من منطقة لا يوجد بها مجال مغناطيسى إلى أخرى بـها مجـال 0.5 T يتجـه بطـول الملف . فإذا استغرق النقل 0.020 s فما مقدار ق.د.ك المتوسطة المستحثة فى الملف اللولبى ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يحدد ق.د.ك المستحثة ؟

الإجابة : إنه قانون فاراداى : $\overline{\text{ق.د.ك}} = -N.(\Delta\Phi/\Delta t)$.

سؤال : ما الذى يجعل الفيض يتغير ؟

الإجابة : إن التعبير العام للفيض هو $\Phi = AB\cos\theta$. حيث $\theta = 0$ فى هذه الحالـة . وبما أن A هى المساحة الثابتة للملف اللولبى ، فـإن التغير فـى B هـو الـذى يجعـل الفيض يتغير .

سؤال : ما هو $\Delta\Phi$ ؟

الإجابة : $\Delta\Phi = (B_2 - B_1)A$ حيث $B_1 = 0$ فى هذه الحالة .

الحل والمناقشة : والمناقشة :

$$\Delta\Phi = (0.50\ T)(4.0\times10^{-4}\ m^2) = 2.0\times10^{-4}\ Wb$$

و ق.د.ك المتوسطة المستحثة هى

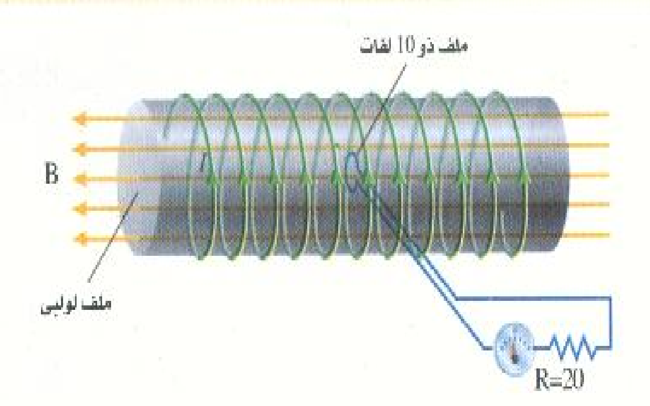
$$\overline{\text{ق.د.ك}} = \frac{(100\ \text{لفة})(2.0\times10^{-4}\ Wb)}{0.020\ s} = 1.0\ V$$

إذا رجعت إلى تعريف وحدة تسلا ، فلابد أنك ستسـتطيع إثبـات أن ويـبر فـى الثانيـة Wbs^{-1} تناظر V (فولت) .

مثال 3-20

يوضح الشكل 10-20 ملفًا صغيرًا به عشر لفات 10 turns ونصف قطره $r = 5.00\ cm$ وقد أدخل هذا الملف فى ملـف لولبـى بحيـث كـان محوراهما متوازيـين . وكـان الملـف متصلاً فى دائرة تحتوى على جلفانومتر ومقاومـة مقدارهـا $R = 20.0\ \Omega$ ، أما الملـف اللولبى فيحتوى على 2000 لفة لكـل متـر مـن طولـه ويحمـل تيـارًا مقداره 15 A فـى الاتجاه المبين بالشكل . وعندما يفتح المفتاح المتصل بمصدر تيار الملف اللولبى فإن تيار

الملف اللولبى يصل إلى الصفر فى 30.0 ms . (أ) ما هو متوسط التيار المار خلال الجلفانومتر ؟ (ب) ما هو اتجاه هذا التيار ؟



شكل 10-20:
عندما يتغير التيار فى الملف اللولبى فإن تيارًا يسرى فى الجلفانومتر . لماذا ؟

استدلال منطقى الجزء (أ) :

سؤال : لماذا سيمر تيار خلال الجلفانومتر ؟

الإجابة : لأن المجال المغناطيسى الأصلى للملف اللولبى سيضمحل إلى الصفر عندما يقطع التيار . ويتسبب بعض هذا المجال فى وجود فيض مغناطيسى خلال الملف ذى اللفات العشر 10 turn . ومع تناقص مجال الملف اللولبى فإن الفيض يتغير مع الزمن بحيث يستحث تيارًا فى الملف .

سؤال : ما الذى يحدد مقدار التيار المتوسط المستحث ؟

الإجابة : يستحث معدل تغير الفيض ق.د.ك متوسطة فى الملف :

$$\overline{\text{ق.د.ك}} = -N_{\text{ملف}}(\Delta\Phi_{\text{ملف}}/\Delta t)$$

ويتحدد التيار المتوسط من قانون أوم : $\bar{I} = \dfrac{\overline{\text{ق.د.ك}}}{R}$

سؤال : ما هو الفيض الأصلى فى الملف الصغير ؟

الإجابة : القيمة الأصلية للمجال هى B_1 فى الملف اللولبى . ولذا فإن

$$\Phi_1 = B_1 A_{\text{ملف}} = B_1 \pi r^2$$

سؤال : ما هى معادلة B_1 ؟

الإجابة : من المعادلة 11-19 نجد أن $B_1 = \mu_0 n I_1$ ، حيث $n = 2000/\text{m}$ و $I_1 = 15.0\ \text{A}$.

الحل والمناقشة : التغير فى الفيض هو

$$\Delta\Phi = 0 - \Phi_1 = -(\mu_0 n I_1)(\pi r^2)$$

$$= -(4\pi \times 10^{-7}\ \text{T.m/A})(2000/\text{m})(15.0\ \text{A})\pi(0.0500\ \text{m})^2$$

$$= -2.96 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$$

يمكننا الآن تجاهل الإشارة السالبة ، فهى مجرد دليل على أن الفيض فى تناقص . وسنفحص اتجاه التغير فى الجزء (ب) . أما مقدار متوسط ق.د.ك المستحثة فهو :

$$\overline{\text{emf}} \text{ (ق.د.ك)} = (10 \text{ turns})(2.96 \times 10^{-4} \text{ Wb}) / (30.0 \times 10^{-3} \text{ s}) = 9.87 \times 10^{-2} \text{ V}$$

أما التيار المتوسط المستحث فهو

$$\overline{I} = \frac{\overline{\text{emf}}}{R} = \frac{9.87 \times 10^{-2} \text{ V}}{20.0\ \Omega} = 4.93 \text{ mA}$$

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ما هو اتجاه المجال الأصلى المار خلال الملف ؟

الإجابة : باستعمال قاعدة اليد اليمنى ، يمكن إثبات أن المجال المغناطيسى الناشئ عن تيار الملف اللولبى يكون متجهًا إلى اليسار فى الشكل 10–20 .

سؤال : عند فتح المفتاح ، هل يزيد المجال فى هذا الاتجاه أم ينقص ؟

الإجابة : ينقص .

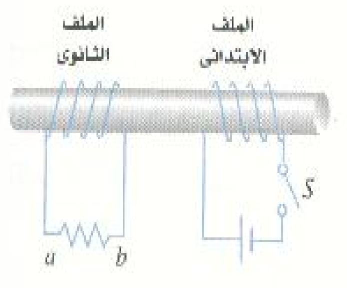
سؤال : فى أى اتجاه يقوم المجال المستحث من الملف الصغير بمعارضة التغير الحادث فى الفيض ؟

الإجابة : إذا كان الملف ينتج مجالاً مغناطيسيًا يتجه يسارًا ، فإن الفيض الذى ينشؤه هذا المجال سيعادل جزئيًا النقص الحادث فى فيض الملف اللولبى .

سؤال : ما هو اتجاه التيار فى الملف الصغير ، الذى يخلق مجالاً مغناطيسيًا إلى اليسار ؟

الإجابة : إنه التيار الذى له نفس اتجاه التيار الأصلى فى الملف اللولبى . ويكون هذا التيار المستحث فى اتجاه من اليسار إلى اليمين خلال الجلفانومتر والمقاوم فى الشكل 10–20 .

20–4 الحث المتبادل



شكل 11–20: لماذا يتجه التيار فى الملف الثانوى من a إلى b فى لحظة فتح المفتاح S ؟

ينطبق قانون فاراداى للقوة الدافعة الكهربية المستحثة فى ملف على أية طريقة من شأنها تغيير الفيض المغناطيسى خلال الملف . وسنفترض أن لدينا ملفين موضوعين جنبًا إلى جنب كما فى الشكل 11–20 ، عندما يكون المفتاح مفتوحًا ، فإن الفيض المغناطيسى سيكون صفرًا فى كليهما . وعندما يغلق المفتاح فجأة فإن الملف الابتدائى يعمل كمغناطيس كهربائى يولد فيضًا مغناطيسيًا فى المنطقة القريبة منه ، بحيث يذهب جزء من الفيض خلال الملف الثانوى . ومن ثم سيتغير الفيض الذى يتخلل الملف الثانوى عند قفل المفتاح فجأة . وطبقًا لقانون فاراداى فإن ق.د.ك مستحثة تتولد فى الملف الثانوى أثناء الفترة التى يرتفع فيها التيار فى الملف الابتدائى من الصفر وحتى قيمته النهائية ولابد أنك قادر على إثبات أن اتجاه التيار المستحث خلال المقاوم فى الشكل 11–20 سيكون من b إلى a بمجرد قفل المفتاح . . ويكون فى عكس الاتجاه بمجرد فتحه .

وتعتمد قيمة ق.د.ك المستحثة فى الثانوى على كثير من العوامل الهندسية ، ومنها عدد لفات السلك فى كل ملف ، ومدى قرب الملفين من بعضهما البعض واتجاه كل منهما بالنسبة للآخر . ومساحة المقطع المستعرض لكل منهما . (لماذا ؟) وبالإضافة إلى

ذلك بما أن الفيض خلال الثانوى سيتناسب مع التيار المار فى الملف الابتدائى فإن ق.د.ك المستحثة فى الثانوى ستتناسب مع معدل تغير التيار فى الابتدائى $\Delta I_p / \Delta t$. ومن ثم نستطيع كتابة المعادلة التالية للقوة الدافعة الكهربية المستحثة فى الثانوى :

$$\text{emf}_{sec} = -M\frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad (\text{ق.د.ك}_{\text{ثانوى}}) \qquad (20\text{-}4)$$

حيث يحتوى ثابت التناسب M على تأثيرات هندسة كل من الملفين . وتسمى M **المحاثة التبادلة** للملفين . فإذا كانت وحدات ق.د.ك هى الفولت والتيار I بالأمبير والزمن t بالثانية فإن وحدة المحاثة M **تُعرَّف على أنها هنرى** (H) أو V . s/A .

وفى النهاية فإن من الطرق المهمة لزيادة المحاثة المتبادلة ، ما تتضمن ربط الملفين بواسطة قلب من مادة فرومغناطيسية كالحديد . ونظرًا للقيمة الكبيرة للإنفاذية المغناطيسية النسبية K_m (القسم 14-19) فإن المجال الذى ينشؤه تيار معين فى الابتدائى سيزداد بشكل هائل مقارنًا بقيمته فى عدم وجود القلب الحديدى . ويزيد هذا بدوره الفيض المغناطيسى الذى يربط الملفين معًا زيادة كبيرة عند أى تيار فى الملف الابتدائى . وعندما يبدأ تغير الملف الابتدائى ، فإن الفيض يتغير وتظهر ق.د.ك مستحثة فى الثانوى . . وتكون أكبر نسبيًا من الحالة التى يخلو فيها الملف من قلب حديدى . ويؤدى هذا إلى قيمة كبيرة للمحاثة المتبادلة ، كما هو واضح من تعريف M فى المعادلة 4-20 .

مثال توضيحى 1-20

لدينا ملفان من السلك ملفوفان حول قلب حديدى ولهما محاثة متبادلة مقدارها 0.50 H . ما مقدار ق.د.ك المتوسطة التى تتولد فى الثانوى عندما يرتفع التيار فى الابتدائى من 2.0 A إلى 3.0 A فى 0.010 s ؟

استدلال منطقى : من المعادلة 4-20

$$\text{ق.د.ك} = \frac{(0.50\ \text{H})(3.0\ \text{A} - 2.0\ \text{A})}{0.010\ \text{s}} = 50\ \text{V}$$

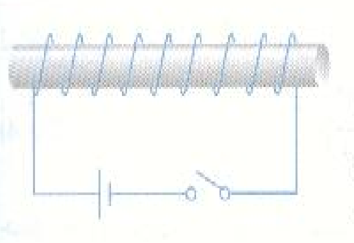
تذكر أن ق.د.ك تستحث فقط أثناء هذه الفترة القصيرة (0.010 s) التى يتغير فيها التيار الابتدائى . وبمجرد أن يصبح التيار مستقرًا فإن الفيض الذى يربط الملفين لن يعود متغيرًا ، و ق.د.ك لن تعود مستحثة .

5-20 المحاثة الذاتية

ينص قانون فاراداى على أن أى تغير فى الفيض المغناطيسى خلال ملف ما يستحث ق.د.ك فى الملف . ويخلق الملف المعزول حامل التيار مجالاً مغناطيسيًا يمر فيضه خلال مستوى الملف . ويستتبع هذا ، أنه عندما يتغير التيار المار فى الملف فإن الفيض الذى يمر

خلاله يتغير أيضًا ولهذا كلما طرأ تغير على التيار فى الملف فإن ق.د.ك **تستحث ذاتيًا** فى الملف طالما كان التغير مستمرًا .

لنفرض أن التيار الموضح فى الشكل 12-20 يتغير من الصفر إلى قيمة نهائية عند قفل المفتاح أولاً . ويتولد عن التيار المتنامى مجال مغناطيسى آخذ فى الزيادة ويتجه يسارًا خلال الملف . وطبقًا لقانون فاراداى تستحث ق.د.ك فى الملف وتحاول أن تهيئ مجالاً معاكسًا يتجه إلى اليمين خلال الملف . ومن ثم يصبح على ق.د.ك المستحثة أن تكون معاكسة للقوة الدافعة الكهربية للبطارية . على أن المفتاح إذا فتح فجأة فإن ق.د.ك المستحثة سوف تعضد البطارية بدلاً من أن تعاكسها . (لابد إنك تستطيع إثبات ذلك) .



شكل 12-20:
عند قفل المفتاح أولاً ، فإن الملف يستحث ق.د.ك داخل نفسه . فهل تعضد هذه القوة الدافعة الكهربية البطارية أم تعاكسها ؟

وسيكون معدل تغير الفيض المغناطيسى خلال الملف متناسبًا مع معدل تغير التيار فى الملف . فإذا كان $\Delta I/\Delta t$ هو معدل تغير التيار خلال الملف ، فإننا نستطيع كتابة متوسط ق.د.ك المستحثة هو

$$\overline{(\text{ق.د.ك})} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (20\text{-}5)$$

ويسمى ثابت التناسب L **المحاثة الذاتية** للملف . وهى تعتمد على هندسة الملف وعلى مادة القلب التى يلتف حولها السلك . ووحدات L هى نفسها وحدات المحاثة المتبادلة أى هنرى .

إذا كان الملف ملفوفًا حول قلب حديدى فإن الفيض خلاله سيكون أكبر بكثير عما لو كان القلب مصنوعًا من مادة غير فرومغناطيسية . ومن ثم فإذا كان المطلوب محاثة ذاتية كبيرة فلابد أن يكون ملف المحاثة ملفوفًا حول قلب حديدى . وسوف نعود للمحاثة المتبادلة والذاتية فى فصول لاحقة ؛ لأنها ذات أهمية خاصة فى دوائر التيار المتردد ، حيث يكون التيار ومن ثم الفيض فى تغير مستمر .

مثال 4-20 :

لديك ملف لولبى مساحة مقطعه المستعرض A وطوله l وعدد اللفات به n لوحدة الأطوال . ما هى محاثته الذاتية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو تعريف المحاثة الذاتية ؟

الإجابة : تفيد المعادلة 5-20 أن L ليست سوى ثابت التناسب بين ق.د.ك المستحثة ذاتيًا ومعدل تغير التيار :

$$L = \frac{\text{emf}}{\Delta I / \Delta t}$$

سؤال : على أى مقادير تعتمد ق.د.ك المستحثة .

الإجابة : ينطبق قانون فاراداى دائمًا :

$$\text{emf} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

وفى هذه الحالة فإن Φ هو الفيض خلال الملف اللولبى الذى يخلقه مجال نفس الملف .

سؤال : ما هو الفيض الذاتى لملف لولبى ؟

الإجابة : طبقًا للمعادلة 11-19 فإن مجال الملف اللولبى الهوائى هو

$$B = \mu_0 nI = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

وبما أن المجال منتظم خلال باطن الملف ، فإن فيضه هو ببساطة

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 NI}{l}A$$

سؤال : ما هو التغير الطارئ فى الفيض عند تغير التيار ؟

الإجابة : إن كل الكميات الواردة بالمعادلة فيما عدا التيار هى كميات ثابتة . ولهذا فإن $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ لابد أن يتناسب مع $\frac{\Delta I}{\Delta t}$:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 NA}{l}\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تحدد emf (ق.د.ك) والتى سأحصل عليها بالتعويض عن هذه النتيجة فى قانون فاراداى ؟

الإجابة :
$$\text{emf} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 NA}{l}\frac{\Delta I}{\Delta t} = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

الحل والمناقشة : يمكنك عند فحص المعادلة الأخيرة أن تكتشف أنه بالنسبة للملف اللولبى :

$$L = N\frac{\mu_0 NA}{l}$$

فإذا وضعنا $n = N/l$ فيمكننا كتابة هذه العلاقة على الصورة :

$$L = \mu_0 n^2 lA$$

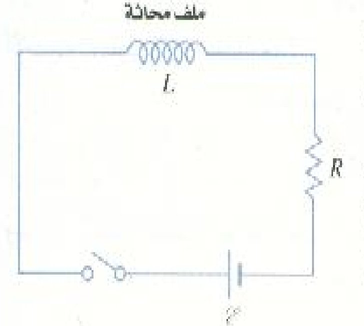
فلو كان قلب الملف اللولبى مملوءًا بمادة إنفاذيتها المغناطيسية النسبية هى K_m ، فإن L لابد من ضربها فى K_m .

تمرين : عين قيمة L لملف به 500 لفة وقلبه هواء وطوله 80.0 cm وقطره 1.20 cm .

الإجابة : 4.44×10^{-5} **H** .

20-6 الدوائر المكونة من محاثة ومقاومة

سنتعرف على بعض الخواص الشيقة والمفيدة للغاية لملفات المحاثة بالتفصيل في الفصل 21 . أما الآن فسنهتم بجانب واحد فقط لسلوك ملف المحاثة - وهو قدرته على اختزان الطاقة .



شكل 13-20:
لماذا لا ينمو التيار إلى القيمة $\mathscr{E}/R$ دفعة واحدة بعد قفل المفتاح مباشرة ؟

لنعتبر أولاً الدائرة الموضحة في الشكل 13-20 ، والتي تتكون من ملف محاثة (يرمز له بالرمز) ومقاومة وبطارية ومفتاح . ولو لم يكن الملف موجودًا بالدائرة لارتفع التيار في الدائرة بمجرد قفل المفتاح ولكان التيار النهائي $\mathscr{E}/R$. على أنه في وجود الملف ، فإن ارتفاع التيار سيكون مصحوبًا بتولد فيض في الملف . ويستحث هذا الفيض ق.د.ك في الملف في اتجاه من شأنه معاكسة التيار المتزايد . وبعبارة أخرى ، فإن ملف المحاثة يبدو بمثابة بطارية ذات قطبية مضادة للبطارية الحقيقية في الدائرة .

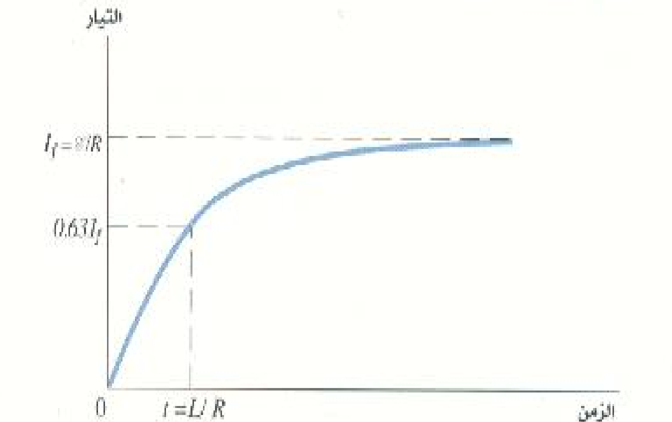
ونتيجة هذا أن تعمل محاثة الملف على خفض معدل الزيادة في تيار الدائرة . وكلما زادت قيمة L ، كلما ارتفع تأثير الملف في تأخير الزيادة في التيار . وعلى الرغم من تأثير التأخير هذا فإن التيار سيصل في النهاية إلى قيمته المستقرة التي يحددها قانون أوم ، أي $\mathscr{E}/R$. ويمكن بمساعدة حساب التفاضل والتكامل اشتقاق اعتماد التيار على الزمن عندما يغلق المفتاح في اللحظة $t = 0$. والنتيجة هي

$$I(t) = I_f\,(1 - e^{-t/(L/R)}) \qquad (20\text{-}6)$$

حيث $I_f = \mathscr{E}/R$ و $e = 2.718$ وهي أساس اللوغاريتمات الطبيعية . وقد تستغرق بعض الوقت في فحص سلوك هذه المعادلة . وستعينك الآلة الحاسبة الصغيرة لديك ، إذ أن فيها أحد الأزرار وعليه علامة « e » مرفوعة لأي أس .

ويوضح الشكل 14-20 رسمًا بيانيًا لسلوك المعادلة (6-20) . ولابد أنك تستطيع إثبات أن المعادلة (6-20) تعطي $I = 0$ إذا كانت $t = 0$. (تذكر أن أي رقم مرفوع للأس صفر سيساوي واحدًا صحيحًا) . والمقدار L/R في أس e له وحدات زمن . وعليك إثبات ذلك .

ويسمى هذا المقدار **الثابت الزمني الحثي** τ_L للدائرة . وستجد عند استعمال الآلة الحاسبة أنه عند $t = L/R = \tau$ ،



شكل 14-20:
ينمو التيار بالشكل المبين هنا بعد قفل المفتاح في الدائرة المبينة في الشكل 13-20 .

$$I(t - \tau_L) = I_f(1 - e^{-1}) = I_f\left(1 - \frac{1}{2.718}\right) = 0.63\, I_f$$

ويوضح الشكل 20-14 هذه النقطة على الرسم البيانى للتيار I مع t أما عند $t = 2\tau_L$ ،

$$I = I_f(1 - e^{-2}) = 0.865\, I_f$$

وكلما كان الثابت الزمنى L/R كبيرًا ، كلما كان ارتفاع التيار أكثر بطئًا فى الوصول إلى القيمة النهائية . وسنحسب الآن مقدار الشغل المبذول فى مواجهة ق.د.ك المعاكسة بالملف .

لقد وجدنا من المعادلة (20-5) أن ق.د.ك المستحثة فى الملف هى $L(\Delta I/\Delta t)$. ومن ثم ، فإنه عند وجود تيار بالملف ، ستتحرك الشحنات تحت تأثير فرق للجهد مقداره $L(\Delta I/\Delta t)$. والشغل الذى يبذله التيار عند حمله لشحنة Δq خلال ملف المحاثة ووجود فرق للجهد مقداره $L(\Delta I/\Delta t)$ ، هو من المعادلة 17-2 :

$$\Delta W = (\Delta q)\,(V) = (\Delta q)\left(L\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة إذا لاحظنا أن $\Delta q/\Delta t$ هى ببساطة I . وإذن

$$\Delta W = LI\Delta I$$

وفى الخلاصة فإن هذا الشغل ضرورى لزيادة التيار من القيمة I إلى $I + \Delta I$.

وعلينا الآن أن نجمع الكميات الصغيرة من الشغل المبذول مع زيادة التيار فى الدائرة بدءًا من الصفر إلى قيمته النهائية القصوى I_f . والنتيجة بالنسبة للشغل المبذول عندما يتغير التيار فى الملف من $I = 0$ إلى $I = I_f$ هى :

$$W = \frac{1}{2}LI_f^2$$

ويمكن اعتبار هذا الشغل على أنه طاقة مختزنة فى الملف . وهناك مثال حى على هذه الطاقة المختزنة وهى عندما يجذب المفتاح ليفتح فى الدائرة الموضحة فى الشكل 20-13 ، إذ أن شرارة كبيرة ستقفز عبر فجوة المفتاح ، إذا كانت المحاثة كبيرة . وبالإضافة إلى هذا فإن جهدًا كبيرًا جدًا سيستحث فى الملف فى محاولة منه فاشلة لكى يعاكس فقدان الفيض الذى يتخلله . . أى أننا قد توصلنا إلى :

إذا مر تيار I فى ملف محاثة L فإنه يكون مختزنًا لطاقة مقدارها $\frac{1}{2}LI^2$.

20-7 الطاقة فى مجال مغناطيسى

لابد أنك ستتذكر أننا قد حسبنا الطاقة المختزنة فى مجال كهربى وذلك عند فحص الطاقة المختزنة فى مكثف (القسم 17-12) . وسنقوم الآن بتعيين الطاقة المختزنة فى مجال مغناطيسى ، آخذين فى الاعتبار الطاقة المختزنة فى ملف محاثة . وسنفترض أن ملف المحاثة هو ملف لولبى طويل . وكما رأينا فى الفصل 19 فإن المجال المغناطيسى

محصورة بالضرورة فى قلب الملف اللولبى وله قيمة منتظمة $B = \mu_0 nI$.

وقد حسبنا قيمة محاثة ملف لولبى فى المثال 4-20 .

$$L = \mu_0 n^2 lA$$

حيث l هو طول الملف اللولبى وA مساحة مقطعه المستعرض . ويلاحظ ، مع ذلك أن lA هو حجم منطقة قلب الملف اللولبى . والطاقة المختزنة داخل الملف اللولبى هى

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 I^2 lA$$

ومنها نجد أن الطاقة لوحدة الحجوم هى :

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{\frac{1}{2}\mu_0 n^2 I^2 lA}{lA} = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 I^2$$

على أن المجال المغناطيسى فى الملف اللولبى هو $B = \mu_0 nI$ ، ومنه ينتج أن $I = B/\mu_0 n$.

وبالتعويض بهذه القيمة فى المعادلة السابقة نجد :

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{1}{2}\mu_0 n^2 \frac{B^2}{\mu_0^2 n^2}$$

$$\text{الطاقة لوحدة الحجوم} = \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad (20\text{–}7)$$

وهى تساوى كثافة الطاقة فى مجال مغناطيسى شدته B . وعلينا مقارنة هذا المقدار بالمقدار $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ (المعادلة 14-17) الذى وجدناه لكثافة الطاقة فى مجال كهربى موجود فى الفراغ .

وإذا كان الملف اللولبى مملوءًا بمادة إنفاذيتها المغناطيسية النسبية هى K_m فإن المعادلة 7-20 ستظل قائمة إذا ضربنا μ_0 فى K_m . وعلى الرغم من أننا اشتققنا المعادلة 7-20 بالنسبة لحالة ملف لولبى إلا إنها نتيجة عامة تمامًا وستتضح أهمية مفهوم الطاقة المختزنة فى مجال مغناطيسى عند دراسة الطريقة التى يحمل الطاقة بها الضوء والموجات الكهرومغناطيسية الأخرى .

مثال 5-20 :

لديك ملف ما محاثته 0.500 H ومقاومته 2.0 Ω . وقد وصل هذا الملف على التوالى مع مفتاح وبطارية 12.0 V ، ومقاوم 4.0 Ω . أوجد (أ) الثابت الزمنى للدائرة ، (ب) القيمة النهائية للتيار ، (جـ) قيمة التيار فى اللحظة $t = 0.050$ s بعد غلق المفتاح ، (د) الطاقة النهائية المختزنة فى ملف المحاثة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة الثابت الزمنى ؟

الإجابة : $\tau_L = L/R$ ، حيث R هى **المقاومة الكلية** فى الدائرة .

سؤال : ما الذى يحدد القيمة النهائية للتيار ؟

الإجابة : إنه قانون أوم : $I_f = \mathcal{E}/R$.

سؤال : كيف يتزايد التيار مع الزمن ؟

الإجابة : تبين المعادلة 6-20 أن $I(t) = I_f\,(1 - e^{-t/\tau_L})$.

سؤال : كيف استخدم هذه العلاقة لحساب التيار عند لحظة معينة ؟

الإجابة : لإيجاد التيار عند أية لحظة من الزمن ، عليك بوضع قيمة t فى المعادلة 6-20 واحسب قيمة المقدار بالاستعانة بأزرار الآلة الحاسبة e^x أو (inv ln) .

سؤال : على أى شىء تعتمد الطاقة المختزنة فى ملف محاثة ؟

الإجابة : الطاقة $= \frac{1}{2}LI^2$

الحل والمناقشة : سنحصل من البيانات المعطاة أعلاه على :

$$\tau_L = \frac{L}{R} = \frac{0.50\ \text{H}}{2.0\ \Omega + 4.0\ \Omega} = 0.083\ \text{s}$$

وكما اعتدنا دائمًا فإن عليك إقناع نفسك بأن الوحدات المشتقة صحيحة ، وفى هذه الحالة بالذات بأن وحدات هنرى لكل أوم تكافئ الثوانى . والتيار النهائى هو

$$I_f = \frac{12.0\ \text{V}}{6.0\ \Omega} = 2.0\ \text{A}$$

أما التيار عندما يكون الزمن هو $t = 0.050\ \text{s}$ فهو

$$I(t = 0.05\ \text{s}) = (2\ \text{A})\ [1 - e^{-(0.050\ \text{s})/(0.083\ \text{s})}]$$

$$= (2\ \text{A})\ [1 - e^{-(0.60)}] = (2\ \text{A})\ (1 - 0.55)$$

$$= (2\ \text{A})\ (0.45) = 0.91\ \text{A}$$

والطاقة النهائية المختزنة هى

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}(0.50\ \text{H})(2.0)^2 = 1.0\ \text{J}$$

ومرة أخرى عليك إثبات صحة الوحدات .

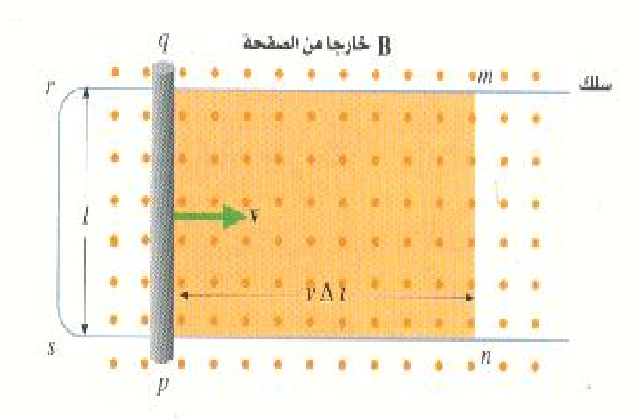
8-20 ق.د.ك الحركية

هناك طرق عديدة للحصول على ق.د.ك مستحثة . ولقد تناولنا حتى الآن تغيرات الفيض خلال ملفات ساكنة بالدرجة الأولى ، وما ينشأ من ق.د.ك المستحثة . على أنه فى بعض الأحيان تكون ق.د.ك المستحثة ناتجة عن حركة سلك خلال مجال مغناطيسى . وفى مثل هذه الحالات ، يكون من المناسب أكثر أن نشتق نتيجة لا تعتمد مباشرة على مفهوم تغير الفيض خلال عروة .

وسنبدأ تناولنا بالرجوع إلى التجربة البسيطة المبينة فى الشكل 15-20 ، حيث ينزلق قضيب طوله التقريبى l بسرعة V على طول سلكين متوازيين على شكل الحرف U يبدأ من m مرورًا بكل من r و s ثم يصل إلى n ويلاحظ أن القضيب والأسلاك تكون عروة هى $(pqrsp)$ إلى اليسار من القضيب . وكلما تحرك القضيب إلى اليمين ازدادت مساحة هذه العروة .

سنفترض الآن أن هناك مجالاً مغناطيسيًا B يتجه خارجًا من الصفحة فى هذه المنطقة . ومع حركة القضيب يزداد الفيض الذى يخترق المساحة لأن المساحة نفسها تزداد ، ولهذا تستحث ق.د.ك فى العروة . ولكى نحسب هذه القوة الدافعة الكهربية فإننا نلاحظ أن القضيب يتحرك مسافة مقدارها $v\Delta t$ فى زمن قدره Δt ، أى أن مساحة العروة تزداد بما قيمته $\Delta A = l(v\Delta t)$ ، وهى عبارة عن الجزء المظلل فى الشكل . ومقدار التغير فى الفيض هو

$$\Delta \Phi = B_{\perp}\Delta A = B_{\perp}lv\,\Delta t$$



شكل 15-20:
عندما يتحرك القضيب نحو اليمين فإن المساحة المحددة بالدائرة $pqrsp$ تزداد مما يؤدى إلى زيادة الفيض المغناطيسى خلال هذه الدائرة . وطبقًا لقانون لنز ، يؤدى هذا إلى ق.د.ك مستحثة فى الدائرة .

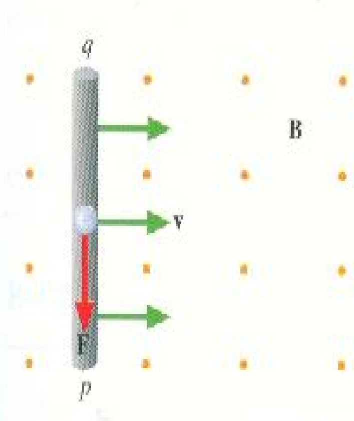
ومن ثم يكون مقدار ق.د.ك المستحثة فى العروة طبقًا لقانون فاراداى هو

$$\text{ق.د.ك المستحثة} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B_{\perp}lv$$

وعليك التأكد من أن هذه القوة الدافعة الكهربية المستحثة سوف تنشئ تيارًا يمر فى الدائرة فى اتجاه حركة عقارب الساعة .

وهناك وسيلة أخرى لتحليل هذا الموقف . اعتبر شحنة موجبة q بداخل القضيب المتحرك كما فى الشكل 16-20 . وتتعرض هذه الشحنة بفضل حركتها بسرعة v خلال B لقوة مقدارها $qvB_{\perp}$. والمجال الكلى فى هذه الحالة متعامد مع سرعة الشحنة ولذا يكون $B = B_{\perp}$ ومنها نستنتج أن :

$$F = q \text{ القوة المؤثرة على } = qvB_{\perp}$$



شكل 16-20:
القوة المؤثرة على شحنة موجبة داخل قضيب موصل وتتحرك عمودية على مجال مغناطيسى .

إذا استعملت قاعدة اليد اليمنى الواردة فى الشكل 10-19 فإنك تدرك أن القوة المؤثرة على q تتجه من النقطة q إلى النقطة p على طول القضيب . ولهذا*

$$E = \frac{F}{q} = vB$$

* وإذا شئنا التحديد فإن قيمة E هذه لا تنطبق إلا فى مناط إسناد يتحرك مع الشحنة .

وإذا تذكرنا أن فرق الجهد الكهربى بين النقطتين مساوٍ للشغل المبذول فى نقل شحنة اختبار قيمتها الوحدة من نقطة إلى أخرى (المعادلة 2-17) ، فسنصل إلى أن فرق الجهد من p إلى q بفضل المجال الكهربى E هو

$$V = El = B_{\perp} v l$$

يلاحظ هنا أن هذا المقدار مساوٍ تمامًا للقوة الدافعة الكهربية المستحثة فى العروة والتى أوجدناها باستخدام قانون فاراداى . ثم إن المجال الكهربى المستحث بحركة الشحنة يسبب مرور تيار فى اتجاه حركة عقارب الساعة فى العروة ، وهو أيضًا نفس الاتجاه الذى وجدناه من قانون فاراداى . وفيما يلى تلخيص للنتائج التى حصلنا عليها :

عندما يتحرك سلك (أو قضيب) طوله l بسرعة **v** عموديًا على كل من المجال المغناطيس **B** وطوله نفسه فإن ق.د.ك تستحث عبر طول هذا السلك :

$$\text{ق.د.ك المستحثة} = B_{\perp} v l \qquad (20\text{-}8)$$

وهى ما يطلق عليها **ق.د.ك الحركية** . ويلاحظ أنه من غير الضرورى وجود عروة أو دائرة كاملة لظهور ق.د.ك مستحثة بين طرفى القضيب . وفى الحالة الأكثر عمومية عندما لا تكون **B** ، **v** والسلك متبادلة التعامد فإن مركبتى **B** و **v** المتعامدتين مع بعضهما ومع السلك هما اللتان تستعملان .

وكثيرًا ما تعاد صياغة الجملة التى سبقت المعادلة 8-20 ليعبر عنها بقطع خطوط المجال المغناطيسى . فعندما يتحرك القضيب المبين فى الشكل 10-20 بحيث يغير الفيض المار خلال العروة بمقدار $\Delta\Phi$ ، فإن القضيب يقطع خطوط المجال المغناطيسى . ولكن ق.د.ك المستحثة فى القضيب هى ببساطة $\Delta\Phi/\Delta t$ ، أى تتناسب مع المعدل الذى يقطع به القضيب خطوط المجال ومن ثم يمكننا النص على :

لقد استحث السلك المتحرك داخل نفسه ق.د.ك تتناسب مع معدل قطع السلك لخطوط المجال المغاطيسى .

ومفهوم ق.د.ك الحركية مناسب فى كثير من المواقف كما سنرى لاحقًا .

وقبل أن نغادر هذا القسم لابد من بضع كلمات حول بقاء الطاقة عندما يتولد تيار بواسطة ق.د.ك حركية . ففى الرسم الموضح بالشكل 15-20 يتحدد مقدار التيار فى الدائرة $(pqrsp)$ بقيمة مقاومة الدائرة . وتتولد طاقة حرارية فى المقاومة R بمعدل I^2R أو $\frac{(\text{ق.د.ك})^2}{R} = \frac{(\text{emf})^2}{R}$ ، فمن أين أتت هذه الطاقة ؟ وتكمن الإجابة فى حقيقة أنه بمجرد تولد التيار فى القضيب المتحرك ، فإن قوة مغناطيسية ستؤثر على القضيب ، ويمكنك إثبات أنه إذا كان التيار يتجه من q إلى p فى الشكل 15-20 ، فإن القوة ستتجه إلى اليسار ، أى فى عكس اتجاه سرعة القضيب . ويعنى هذا ضرورة تطبيق **قوة مساوية فى المقدار واتجاهها هو اتجاه الحركة حتى تضمن سرعة ثابتة للقضيب .** وسنعبر عن هذا بصيغة رياضية :

القوة المغناطيسية المؤثرة على القضيب : إلى اليسار $F = BIl$

والقدرة التي تنشأ عن تطبيق قوة مساوية إلى اليمين هي :

$$F_{app}v = BIlv = Blv\frac{\text{emf}}{R} = Blv\frac{(Blv)}{R} = \frac{(Blv)^2}{R}$$

والقدرة الحرارية المبددة في R هي : $P = \frac{(\text{emf})^2}{R} = \frac{(Blv)^2}{R}$

من الواضح أن القدرة التي تسببها القوة المطبقة مساوية للقدرة المبددة على هيئة حرارة في المقاومة . أي أن الطاقة ـ كما هي دائمًا ـ محفوظة .

مثال 20-6 :

ثبت قضيب طوله 5.0 m أفقيًا بحيث كان محوره في الاتجاه شرق ـ غرب ثم سمح له ليسقط مباشرة إلى أسفل . ما مقدار ق.د.ك المستحثة بداخله عندما تكون سرعته 3.0 m/s إذا كان المجال المغناطيسي لأرض 0.60 G ويميل بزاوية مقدارها 53° تحت الخط الأفقي ؟

استدلال منطقي :

سؤال : على أي شيء تعتمد ق.د.ك المستحثة ؟

الإجابة : على سرعة القضيب المتعامدة مع طوله ، وطوله وشدة المجال المغناطيسي المتعامد مع السرعة . والمعادلة 8–20 تعطي :

$$\text{emf} = B_{\perp}vl$$

سؤال : كيف يمكن حساب $B_{\perp}$ ؟

الإجابة : بما أن السرعة رأسية ، تكون $B_{\perp}$ هي المركبة الأفقية للمجال **B** والرسم المتجهي البياني للمجال سيشير إلى أن $B_{\perp} = B\cos 53°$.

سؤال : قيمة المجال المعطاة هي 0.60 G . فما هي وحدات SI المقابلة ؟

الإجابة : العلاقة بين الوحدتين هي $1\text{ T} = 10^4\text{ G}$.

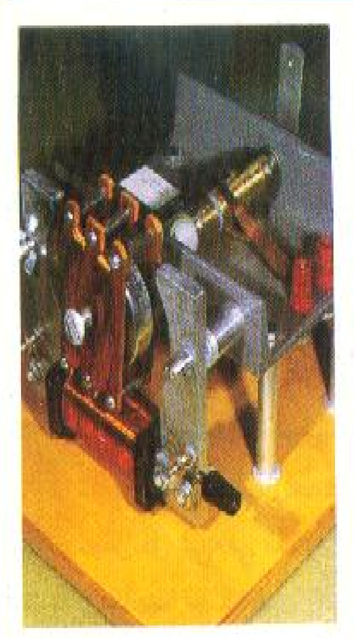
الحل والمناقشة :

$$\text{emf} = (0.60 \times 10^{-4}\text{ T})(\cos 53°)(3.0\text{ m/s})(5.0\text{ m}) = 5.4 \times 10^{-4}\text{ V}$$

20–9 مولدات التيار المتردد

المولد هو جهاز يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية . وهو يؤدي هذا عن طريق تغيير الفيض المغناطيسي خلال ملف ، مستحثًا بذلك ق.د.ك بين طرفي الملف ومن الناحية النظرية فإن الفيض يمكن تغييره إما بتحريك مغناطيس بالنسبة للملف أو تحريك الملف بالنسبة للمغناطيس . وتحقيق العملية الثانية أسهل من الناحية التطبيقية وهي عادة ما تستعمل .

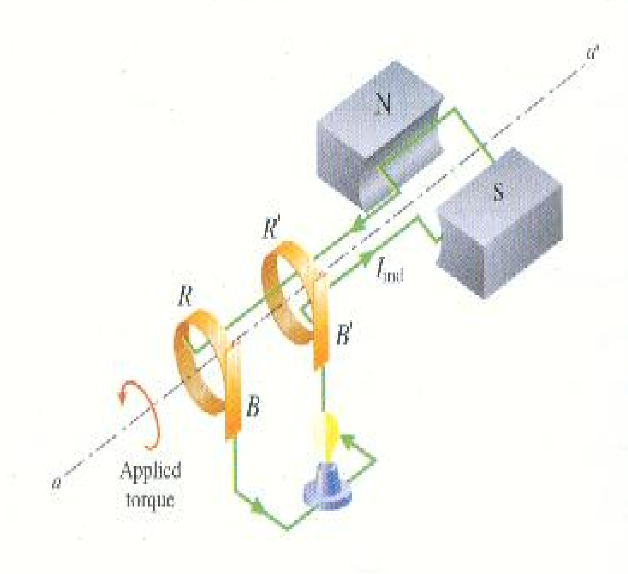
ويوضح الشكل 17–20 رسمًا تخطيطيًا لمولد بسيط ، حيث تدار عروة من السلك بواسطة مصدر خارجي للطاقة ، في وجود المجال المغناطيسي للمغناطيس . (وتستبدل العروة عمليًا بملف ملفوف حول قلب حديدى لكى يقوى التأثيرات التى ذكرناها) وبدوران العروة فإن الفيض الذى يتخللها يتغير بشكل مستمر . ويستحث هذا الفيض المتغير ق.د.ك فى العروة ، وتؤدى هذه إلى تيار يمر فى العروة فى الاتجاه المشار إليه فى الشكل . ويمكن استخدام هذا التيار فى شغل مفيد مثل إضاءة بصيلة مصباح كما بالشكل .



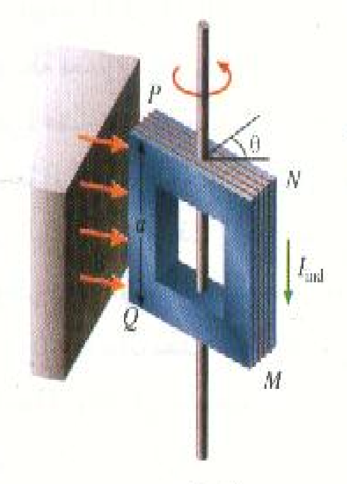
نموذج لاستعراض عمل المولد وهو يدار باليد . وهو مكون من ملف دوار ومغناطيس يحيط به (يغذى هذا المغناطيس الكهربى بواسطة الملف المستطيل السفلى) ، وفرشاتان حلقتى الإنزلاق على محور الملف (اللتان تتصلان بالطرفين الأحمرين) .

ولابد أن يبذل مصدر الطاقة الخارجي الذى يدير الملف الحد الأدنى من الشغل ضد قوى الاحتكاك وذلك فى مولد جيد التصميم . على أنه لابد أن يبذل شغلاً ما لأن المولد ينتج تيارًا يمكنه بذل شغل . ونستطيع إدراك كيفية حدوث التبادل بين الشغل عند المدخل والشغل عند المخرج ، إذا تذكرنا ما يحدث لسلك يحمل تيارًا فى ملف . وحيث أن السلك يمر خلال مجال مغناطيسي ، فإن التيار يتعرض لقوة بفضل المجال المغناطيسي . وكما رأينا فى المثال الوارد فى القسم السابق فإن هذه القوة تكون فى اتجاه يعاكس دوران الملف ؛ وكلما زاد التيار زادت القوة المعاكسة . وهكذا نرى أن المصدر الخارجي للطاقة عليه أن يبذل شغلاً لإدارة الملف ، وأنه كلما زاد التيار المسحوب من المولد للاستفادة منه فى شغل مفيد ، كلما زاد الشغل الذى يبذله مصدر الطاقة الخارجي لإدارة الملف . وبهذا فإن مصدر الطاقة الذى يدير المولد هو الذى يوفر الطاقة التى يستخدمها تيار المولد ليبذل شغلاً مفيداً . وقد يكون أحد مساقط المياه أو محركات الديزل مثالاً على المصدر الخارجي للطاقة . ولنفحص الآن عمل المولد بشيء من التفصيل حتى نتمكن من معرفة شكل ق.د.ك التى ينتجها .

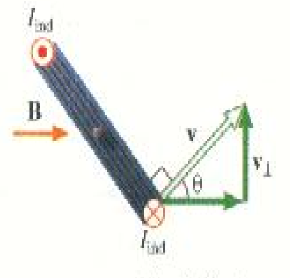
سنبدأ بتخيل ملف يحتوى على N عروة بدلاً من العروة البسيطة فى الشكل 17–20 . يدور الملف حول المحور $a\,a'$ فى مجال مغناطيسي منتظم . ويلاحظ أن أحد طرفى الملف متصل بحلقة R بينما يتصل الطرف الثاني بالحلقة R' . وتثبت هاتان الحلقتان – **حلقتا الانزلاق** – جيدًا بالملف وتدوران معه كوحدة واحدة . ويتم الاتصال بين الحلقتين الدائرتين والطرفين الخارجين الثابتين بواسطة فرشاتين B و B' تنزلقان على الحلقتين . وقد تكون الفرشاتان عبارة عن شريطين قصيرين من الصلب الزنبركى فى المحركات البسيطة للغاية .



شكل 17–20:
عندما تدور العروة فى مجال مغناطيسى فإن ق.د.ك مترددة تتولد بين الطرفين B و B' .



(أ) منظور



(ب) منظر علوى

شكل 18-20:
تتواجد ق.د.ك مستحثة فى الملف الدوار ، مما ينشأ عنه تيار مستحث فى الملف .

وسنحاول التعرف على كيفية تولد ق.د.ك المستحثة بين طرفى الملف ، ولهذا سنرجع إلى الشكل 18-20 (أ) حيث يفترض أن الملف يدور فى الاتجاه المبين . وكما ترى فإنه يتحرك من وضع تكون خطوط المجال فيه متعامدة مع مستواه إلى وضع تمر الخطوط وكأنها تنزلق عليه . وبعبارة أخرى فإن الفيض الناتج عن خطوط المجال المتجهة إلى اليمين خلال الملف يتناقص ، وبسبب هذا التغير فإن ق.د.ك تستحث فى الملف .

وسندرك عند استعمال قانون لنز أن ق.د.ك المستحثة فى الملف بسبب الفيض المتغير ، تستحث هى الأخرى تيارًا فى الاتجاه المبين ، لكى تحاول المحافظة على الفيض خلال الملف ، أى تحاول معاكسة التغير .

على أنه تجب ملاحظة ما يحدث عندما يدور الملف بزاوية مقدارها 180° من الوضع المبين . سيظل كل شىء فى الشكل 18-20 (أ) كما هو فيما عدا أن النقطتين M و N سيتبادلان مكانيهما مع النقطتين Q و P . ونتيجة لهذا فإن التيار المستحث سيتجه الآن فى اتجاه يعاكس ما كان عليه من قبل . ومن الواضح أن التيار المستحث فى الملف سيظل يعكس اتجاهه كلما استمر الملف فى الدوران .

وسنقوم الآن بتحليل الموقف بطريقة كمية حيث نحسب $\Delta\Phi / \Delta t$ بالنسبة للملف ثم نستخدم قانون فاراداى لحساب ق.د.ك المستحثة . وتكون هذه الطريقة مناسبة جدًا إذا لجأنا إلى حساب التفاضل والتكامل . على أن بإمكاننا اختيار تحليل الموقف بدلالة ق.د.ك الحركية .

سنحسب ق.د.ك المستحثة فى الضلع MN الذى يتحرك بسرعة $\mathbf{v}$ خلال المجال وذلك بحساب $v_{\perp}$ أولاً ، وهى مركبة السرعة $\mathbf{v}$ ، المتعامدة مع $\mathbf{B}$ بالرجوع إلى الشكل 18-20 (ب) نجد أن $v_{\perp} = v \sin\theta$. وبما أن الضلع MN والمجال $\mathbf{B}$ ، والسرعة $\mathbf{v}_{\perp}$ تتعامد فيما بينها فإن ق.د.ك المستحثة فى MN ستكون :

$$(\text{emf})_{MN} = B(v \sin\theta)(a)$$

وسندرك عند استعمال قاعدة اليد اليمنى بالنسبة لانحراف الشحنات الموجبة المتحركة أن اتجاه التيار المستحث يكون من N إلى M فى الضلع MN ومن Q إلى P فى الضلع PQ . ومن ثم فإن ق.د.ك مستحثة مماثلة فى PQ سوف تتراكم مع ق.د.ك المستحثة فى MN . يلاحظ أن الضلعين PN و MQ لا يقطعان خطوط المجال عند دوران الملف ؛ ولهذا لن تستحث ق.د.ك فى هذين الضلعين .

$$\text{ق.د.ك المستحثة فى العروة} = 2\,Bva \sin\theta$$

ويمكن وضع هذه المعادلة فى صورة أكثر ملاءمة ، إذا لاحظنا أن v هى السرعة المماسية للنقطة M وهى ترسم دائرة حول محور الدوران ؛ فإذا كان نصف قطر هذه الدائرة هو r $\left(r = \frac{1}{2}\overline{MQ}\right)$ فإن :

$$v = \omega r = 2\pi f r$$

حيث ω هى السرعة الزاوية الثابتة للملف و f هو تردد الدوران للملف ولا شك أنك

تتذكر من الفصلين السابع والثالث عشر أن ω تقاس بوحدات الزوايا النصف قطرية فى الثانية ويقاس f بوحدات هيرتز . وبالإضافة إلى هذا ، فالزاوية θ هى ببساطة زاوية دوران العروة وتتزايد باستمرار حسب العلاقة :

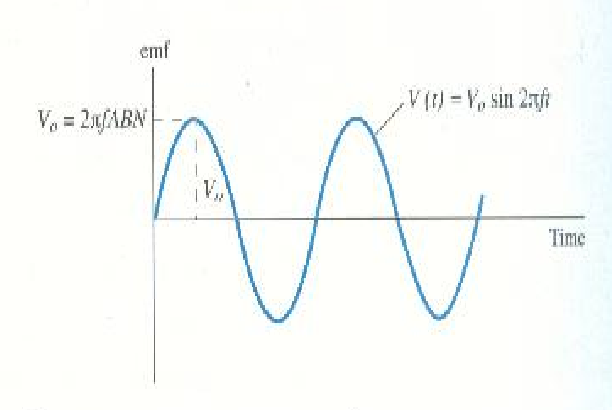
$$\theta = \omega t = 2\pi ft$$

وعند إجراء التعويض المناسب ، فإن ق.د.ك المستحثة تصبح :

$$\text{emf} = 2\pi fB(2ra) \sin 2\pi ft$$

ولكن $2ra$ ليست سوى مساحة العروة ولذا تكون النتيجة النهائية هى

$$\text{emf} = 2\pi fAB \sin 2\pi ft \qquad (20\text{-}9)$$



شكل 19-20:
تستحث قوة دافعة كهربية مترددة فى ملف يدور فى مجال مغناطيسى منتظم وتتغير ق.د.ك كدالة جيبية مع الزمن .

وعندما نتعامل مع ملف به N لفة بدلاً من عروة منفردة فإن ق.د.ك ستكون أكبر N مرة .

وكما هو واضح ، فإن **ق.د.ك المستحثة فى ملف دوار تتغير كدالة جيبية مع الزمن** كما يبين ذلك الشكل 19-20 ، حيث تصل ق.د.ك المستحثة (أو الفولطية) إلى قيمتها القصوى عندما يكون $\sin 2\pi ft = 1$ ، وعندئذ تصبح قيمتها العظمى هى $2\pi fABN$. من المنطقى إذن أن الفولطية القصوى تكون كبيرة عند قيم f الكبيرة (أى أن الفيض يتغير بسرعة) ، وعند قيم A و B الكبيرة (أى عندما يكون الفيض نفسه كبيرًا) ، وعندما يكون عدد اللفات بالملف كبيرًا .

وكثيرًا ما تكتب المعادلة 9-20 على الصورة البديلة التالية :

$$V = V_0 \sin 2\pi ft$$

حيث تعبر V عن قيمة الفولطية عند أية لحظة t ، و V_0 عن القيمة القصوى لها . ومن الواضح أن الفولطية فى الملف الدوار تتغير كدالة جيبية وتعكس اتجاهها مرتين فى كل دورة .

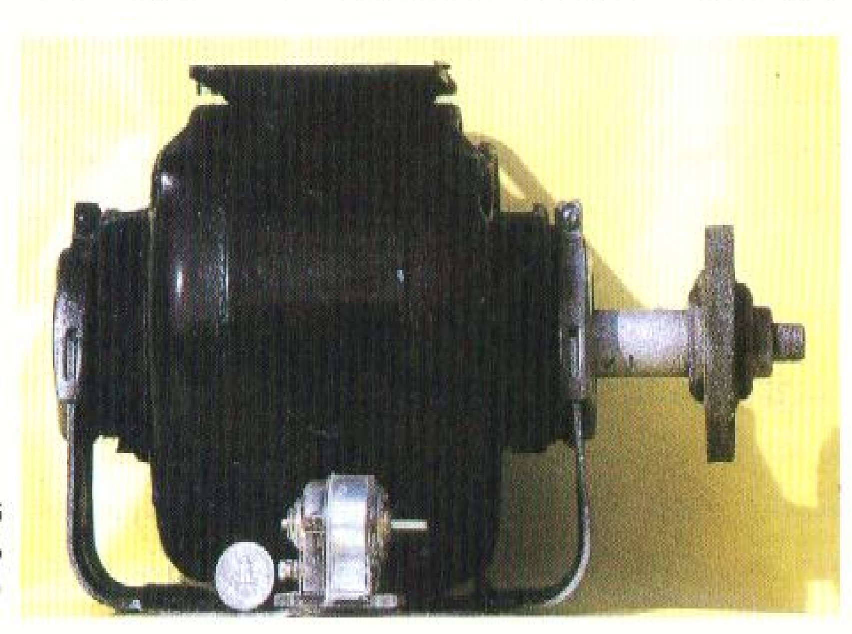
وهكذا يصير واضحًا مما تقدم أن ملف السلك الذى يدور بسرعة زاوية ثابتة فى مجال مغناطيسى ، ستتولد عند طرفيه ق.د.ك مترددة . ولو أن مثل هذا المولد هو المستخدم كمصدر للقدرة فى الدائرة البسيطة المبينة فى الشكل 20-20 ، فإن التيار المار فى المقاوم سيعكس اتجاه $2f$ مرة كل ثانية . (يلاحظ أن الرمز المستخدم لمولد جهد متردد هو (~)) .

وعادة ما تكون مولِّدات التيار المتردد التى تستخدمها شركات توزيع القوى الكهربائية ، أكثر تعقيدًا من التى ناقشناها هنا ، إلا أن نظرية عملها الأساسية هى نفسها . والطاقة الميكانيكية اللازمة لإدارة الملف يتم توفيرها عادة باستخدام توربينات بخارية أو بقوى اندفاع الماء . وسنتناول بإيجاز عملية تحويل الطاقة فى نظام كالموضح فى الشكل 20-20 .

شكل 20-20:
دائرة تيار متردد بسيطة .

عندما تكون الدائرة مفتوحة بحيث لا يمر بها تيار خلال ملف المولد ، فإن القدر اليسير من القوة سيكون كافيًا لإدارة الملف . ولكن بمجرد أن يسحب تيار من المولد (الملف) ، فإن المجال المغناطيسى يؤثر بقوة على أسلاك المولد الحاملة للتيار ، وتكون هذه القوة بحيث تحاول إيقاف الملف عن الدوران . ومن ثم فالطاقة الميكانيكية التى يغذى بها المولد تعتمد على مقدار التيار المسحوب من نفس المولد . أى أن المزيد من التيار يتطلب المزيد من الطاقة الميكانيكية .

وفى اللحظة التى يكون فيها جهد المولد V فإن القدرة التى تصل إلى المقاوم فى الشكل 20-20 ستكون VI (المعادلة 7-18) . ومن الواضح أنه عند قيم صغيرة جدًا للتيار ، فإن القدرة التى يستهلكها المقاوم تكون صغيرة والطاقة الميكانيكية اللازمة لتشغيل المولد ستكون هي الأخرى صغيرة . ومن ثم نرى أن **الطاقة اللازمة لتشغيل المولد تعتمد على مقدار الطاقة المسحوب منه إذ تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية بواسطة التفاعل بين المجال المغناطيسى وحركة الشحنة داخل ملف المولد .**

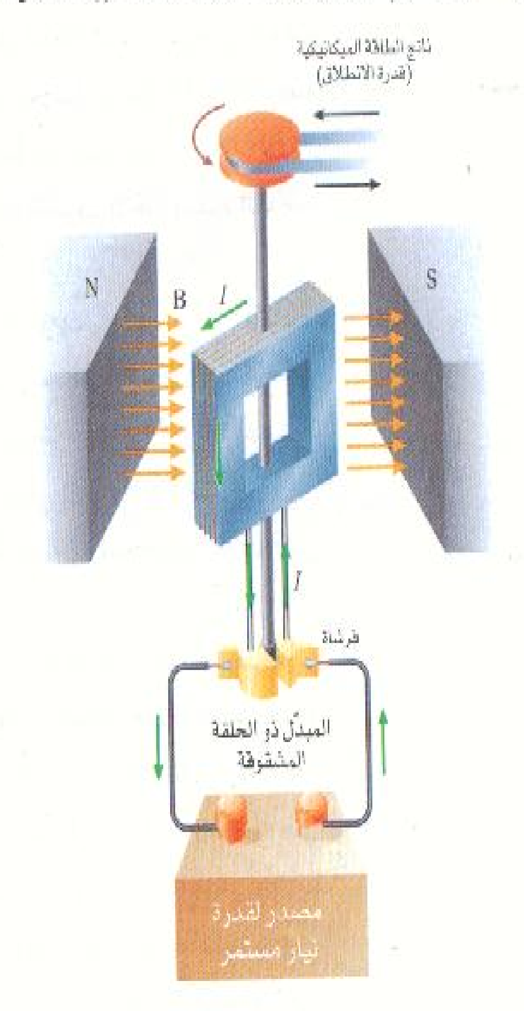


تستخدم المحركات الكهربائية فى العديد من التطبيقات ويظهر هذا من التنوع الكبير فى أحجامهما .

20-10 المحركات الكهربائية

المحرك الكهربائى هو جهاز يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية . ويوضح الشكل 20-21 رسمًا تخطيطيًا لمحرك بسيط ، حيث يبعث مصدر للقوة الدافعة الكهربية (فى هذه الحالة بطارية) التيار خلال عروة من السلك الذى يقع جزء منه فى

المجال المغناطيسى الذى يوفره مغناطيس دائم . وهذا المجال المغناطيسى الخارجى هو الذى يجعل العروة تتعرض لعزم دورانى بإدارة العروة حول محورها . (ويمكنك الاقتناع



شكل 21-20:
محرك بسيط يعمل بالتيار المستمر وعندما تكون حلقتا الانزلاق فى الوضع المبين بالشكل ، فإلى أى جهة يدور المحرك ؟

بأن العروة تدور في الاتجاه المبين إذا طبقت قاعدة اليد اليمنى بالشكل 10-19) وهكذا فالطاقة التى تقدمها البطارية للعروة تجعل العروة تدور ، أى تجعلها تبذل شغلاً خارجيًا بالاستعانة ببكرة متصلة بمحورها . وكلما زاد الشغل الذى يبذله المحرك ، كلما كان من الصعب عليه الدوران وكلما زاد بالتالى مقدار الطاقة الواجب على البطارية أن تقدمه .

ولنتخيل أننا استعملنا ملفًا ملفوفًا حول قلب حديدى بدلاً من العروة المنفردة التى تظهر فى الشكل 21-20 ، وذلك حتى يبدو المحرك أقرب إلى الواقع . ولقد درسنا من قبل أن الملف ذا القلب الحديدى يعمل كمغناطيس كهربائى إذا مر به تيار . وبالرجوع إلى القسم 11-19 والشكل 23-19 فسنقتنع أن الجانب الأمامى للملف (كما هو مبين بالشكل) هو قطبه الشمالى وأن الجانب الخلفى هو القطب الجنوبى . ونظرًا لوجود قطبى المغناطيس الدائم بجوار الملف ، فإن القوتين المؤثرتين على قطبى الملف ستجعلانه يدور فى الاتجاه المبين . إلا أنه عندما يصبح مستوى الملف متعامدًا مع الصفحة فإن قطبه الجنوبى سيكون أقرب ما يكون من القطب الشمالى للمغناطيسى الدائم ؛ حيث يتوقف عندئذ الملف عن الدوران إذا لم يحدث شىء آخر .

والواقع أنه لكى يظل الملف دائرًا ، فلابد لنا من عكس اتجاه التيار المار بداخله

بحيث ينعكس قطباه الشمالى والجنوبى . وتتم عملية العكس هذه بواسطة ما يسمى **المبدّل ذو الحلقة المشقوقة** . ويتم إجراء الاتصال الكهربى باستعمال نصفى الحلقة المنفصلين وخلال الفرشاتين الثابتتين اللتين تنزلقان على الحلقة عندما تدور هى والملف معًا . (وتصنع الفرشاتان عادة من كتلتين من الجرافيت الموصل سهل الانزلاق ، وهما تنضغطان على نصفى الحلقة بواسطة زنبركين) . ويلاحظ أنه عندما يدور الملف فإن التيار يدخل إليه أولاً من خلال أحد نصفى الحلقة ثم من خلال النصف الآخر وبهذه الطريقة ينعكس التيار المار خلال الملف في اللحظة المناسبة تمامًا لكى يظل الملف دائرًا .

وهناك العديد من أنواع المحركات الكهربائية ، وكثير منها يستخدم مغناطيسات كهربائية بدلاً من المغناطيسات الدائمة . بل إن معظمها يستعمل أكثر من ملف حتى ينتج عزم دوران أكثر ثباتًا . وبعض المحركات تتم تغذيته بفولطية مترددة ومستمرة بينما يتغذى البعض الآخر إما على هذه أو تلك فقط . وعلى أية حالة فإن مصدر ق.د.ك يقوم بإمداد الملف بالطاقة بواسطة التيار . وهذه الطاقة هى التى يستخدمها الملف لكى يبذل الشغل .

وقبل أن نترك موضوع المحركات ، لابد أن نشير إلى أن المحرك يشبه إلى حد بعيد مولد يدور في عكس تسلسل العمليات . فالملف الدوار فى المحول يعمل كملف المولد وتتولد بداخله ق.د.ك ، وهذه تكون فى اتجاه بحيث تعاكس ق.د.ك التى تدير المحرك . ولهذا السبب تسمى **ق.د.ك عكسية أو مضادة** وبما أن مقاومة المحرك تكون صغيرة فى العادة ، فإن ما يحدد قيمة التيار خلاله بدرجة أساسية هو ق.د.ك العكسية . وعندما يزيد الحمل على محرك ما فإنه يبطئ من حركته ، وهذا يؤدى إلى انخفاض ق.د.ك العكسية (لماذا ؟) ويسمح بذلك للمحرك أن يسحب تيارًا أكبر ، والتيار الزائد المار فى محرك به تحميل زائد قد يؤدى أحيانًا إلى احتراق ذلك المحرك . ولكى تتم حماية المحركات من هذه العملية فإن لكثير منها مفتاح حرارى يقوم بقطع الطاقة عنها (بإطفائها) عندما ترتفع درجة حرارتها بشكل زائد .

مثال 20-7 :

تبلغ مقاومة لفات محرك يعمل بالتيار المستمر $2.0\ \Omega$ وهو مزود بمغناطيس دائم . وقد صمم هذا المحرك الخاص ليوفر قدرة ميكانيكية مقدارها 500 W عندما يغذى من خط قدرة 120 V يمده بتيار يصل إلى 20 A . (أ) ما هو التيار الذى يسحبه المحرك ؟ (ب) ما مقدار ق.د.ك العكسية التى تتولد فى المحرك ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : بماذا ترتبط القدرة الناتجة عن المحرك ؟

الإجابة : إن بعض القدرة التى تغذى المحرك من خط القدرة ، يتحول إلى حرارة مستهلكة فى مقاومة المحرك . ويمكن تحويل ما يتبقى إلى قدرة ميكانيكية .

سؤال : ما هى المعادلة المعبرة عن القدرة التى تمدها البطارية ؟

الإجابة : من المعادلة 7-18 : $P = IV$ (المقدمة من البطارية) .

سؤال : ما هى القدرة المبددة فى المقاومة ؟

الإجابة : إنها مرة أخرى المعادلة 7-18 : $P = I^2R$ (الحرارة)

سؤال : ما هى معادلة القدرة التى يوفرها المحرك ؟

الإجابة : $P = P$ (المتوفرة) $- P$ (حرارة) $= 500\ W$

وهذه العلاقة تؤدى إلى معادلة من الدرجة الثانية ، حلها يؤدى إلى معرفة التيار :

$$IV - I^2R = 500\ W$$

سؤال : ما الذى يحدد قيمة ق.د.ك العكسية للمحرك ؟

الإجابة : إن المحرك كعنصر من عناصر الدائرة ، يمكن معاملته كمقاومة متصلة على التوالى مع ق.د.ك العكسية الخاصة به . (الشكل 20-22) . ولدينا من قاعدة العروة لكيرتشوف :

$$110\ V - \mathscr{E} - IR = 0$$

فإذا كانت قيمة I معلومة ، لأمكن إيجاد ق.د.ك العكسية .



شكل 20-22:
يعمل المحرك كما لو كان مقاومة متصلة على التوالى مع ق.د.ك عكسية .

الحل والمناقشة : أولاً ، لابد من وضع المعادلة من الدرجة الثانية فى I على الصورة القياسية : $ax^2 + bx + c = 0$

$$-RI^2 + VI - 500\ W = 0$$

ومنها نستنتج أن المعاملات هى : $a = -R$ ، $b = V$ ، $c = -500$

وحل هذه المعادلة هو :

$$I = \frac{-V \pm \sqrt{V^2 - 4(-R)(-500)}}{2(-R)}$$

والحلان الممكنان لهذه المعادلة يمكن إيجادهما عند التعويض عن قيمتى V و R

$$I = 5\ A\ ,\quad 50\ A$$

وعلينا دائمًا اختيار الحل الذى يؤدى إلى معنى **فيزيائى** . والقيمة الكبيرة 50 A للتيار أكبر من أن يوفرها خط القدرة . أما إذا أخذنا الحل الثانى وهو $I = 5\ A$ فإننا سنجد قيمة ق.د.ك العكسية .

$$\mathscr{E} = 110\ V - IR = 100\ V$$

ومنها يتضح أن ق.د.ك العكسية للمحرك يمكن أن تكون كبيرة تمامًا .

مثال 20-8 :

صمم مولد للتيار المتردد لكى يعطى جهدًا مترددًا تردده 60 Hz ؛ ويحتوى ملفه على 500 لفة ويدور فى مجال مغناطيسى شدته 0.50 T . (أ) ما هى مساحة الملف التى

تجعل القيمة القصوى للقوة الدافعة الكهربيـة 120 V ؟ (ب) وإذا كـانت ق.د.ك تتغير مع الزمن حسب العلاقة البيانية فى الشكل 19–20 ، فما هى قيمة الجهد اللحظى عند $t = 10^{-3}$ s ؟ وبعد كم من الوقت سيكون للفولطية نفس الطور ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف تعتمد ق.د.ك القصوى على مساحة الملف ؟

الإجابة : تتناسب ق.د.ك القصوى مع A تناسبًا طرديًا .

سؤال : على أى شىء آخر تعتمد ق.د.ك القصوى ؟

الإجابة : على التردد وعدد اللفات والمجال المغناطيسى :

$$(\text{ق.د.ك})_{\text{قصوى}} = \text{emf}_{\max} = V_0 = 2\pi fNAB$$

حيث $V_0 = 120$ V

سؤال : ما هى المعادلة التى تصف السلوك الزمنى الوارد فى الشكل 19–20 ؟

الإجابة : لابد من تذكر ، أن المعادلة العامة للدالة الجيبية فى الاعتماد على الزمن هـى $\sin 2\pi ft$ ، وذلك من الفصل الرابع عشر . ولـهذا فإن $V(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$.

سؤال : ما هى قيمة V عند زمن 10^{-3} s ؟

الإجابة : لابد من إيجاد قيمة الجيب (sin) مع تذكر أن $(2\pi ft)$ مقاس بالتقدير الدائرى . وبما أن $f = 60$ Hz ، فإن :

$$2\pi ft = 2\pi(60/\text{s})(10^{-3}\ \text{s}) = 0.377\ \text{rad}$$

سؤال : ما هى تكرارية اتخاذ الجهد لنفس القيمة فى طوره ؟

الإجابة : إنه يتخذ نفس القيمـة مـرة واحـدة ، كـل دورة ، أو خـلال **الزمن الـدورى** للذبذبة والزمن الدورى يساوى $1/f$.

الحل والمناقشة :

$$A = \frac{V_0}{2\pi fNB} = \frac{120\ V}{2\pi(60/\text{s})(500)(0.50\ \text{T})}$$

$$= 6.4 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$$

وتناظر هذه الكمية مساحة مربع طول ضلعه نحو 2.5 cm (أو بوصة واحدة) .

وعند اللحظة $t = 10^{-3}$ s فإن $\sin(0.377\ \text{rad}) = 0.368$. أى أن قيمة الجهد فى هـذه اللحظة :

$$V = (120\ \text{V})(0.368) = 44.2\ \text{V}$$

والزمن الدورى للجهد المتذبذب هو

$$T = \frac{1}{f} = 0.0167\ \text{s}$$

20-11 المحولات

يتم أحد أهم تطبيقات الحث الكهرومغناطيسي في المحول ، وهو أداة تقوم بتغيير (أو تحويل) جهد متردد إلى جهد متردد آخر . ففي جهاز تليفزيون عادى ـ مثلاً ـ يغير المحول الجهد المتردد الداخل للجهاز ومقداره 120 V إلى جهد أعلى مقداره 15,000 V يلزم لتشغيل أنبوبة الصور بالجهاز . وكمثال آخر على استخدام المحول ، فإن جرس الباب العادى يحتاج إلى جهد يبلغ نحو 9 V ولذا لابد من محول للحصول على هذا الجهد المنخفض من جهد خط القدرة بالمنزل وهو 120 V . ولا يمكن استعمال المحولات لتحويل الجهود الخاصة بالتيار المستمر ، نظرًا لأهمية حدوث فيض دائم التغير حتى تعمل .



تستخدم المحولات (التى تظهر فى مقدمة الصورة) فى محطة القوى الكهربية الفرعية لتحويل الجهد المتردد العالى الذى تنقله عبر البلاد خطوط نقل القدرة الكهربية إلى جهود منخفضة تستخدم خطوط التوزيع المحلية .

ويوضح الشكل 23-20 محولاً نموذجيًا . ويتكون المحول من قلب حديدى يلتف حوله ملفان ، أولهما هو الابتدائى (ويحتوى على N_p لفة) وثانيهما الثانوى (وبه N_s لفة) . يتصل الملف الابتدائى عادة بمصدر التيار المتردد . فيتكون بهذا فيض مغناطيسى متغير فى القلب الحديدى . وبما أن خطوط الفيض تميل إلى اتباع الحديد فإن الخطوط تأخذ فى الدوران مخترقة الملف الثانوى كما فى الشكل . ولهذا يكون الفيض Φ خلال كل من الملفين الابتدائى والثانوى هو نفسه .

يؤدى الفيض المتغير خلال الملف الثانوى إلى ظهور ق.د.ك مستحثة فيه :

$$\text{ق.د.ك الثانوية} = -N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

ومقاومة الملفات فى معظم المحولات مهملة ولهذا فإن ما يحدد قيمة التيار فى الملف الابتدائى هو ق.د.ك العكسية فى الملف الابتدائى والتى استحثها بنفسه . وبعبارة أخرى فإن ق.د.ك المستحثة فى الابتدائى ستكون مساوية لفولطية مصدر القدرة ونستطيع

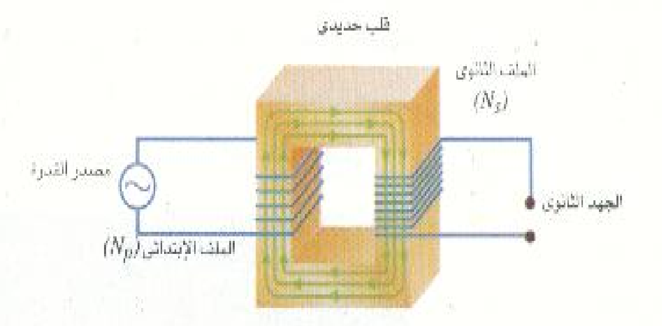
من ثم أن نكتب .

$$\text{ق.د.ك الابتدائية} = -N_p \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

حيث Φ هو نفس الفيض الذى يتخلل الملف الثانوى .

والنسبة بين هاتين القوتين الدافعتين هى

$$\frac{\text{ق.د.ك الثانوية}}{\text{ق.د.ك الابتدائية}} = \frac{N_s}{N_p} \qquad (20\text{–}10)$$



شكل 23-20:
محول رافع ذو قلب حديدى

وهذه هى **معادلة المحول** ، وهى تعبر عن العلاقة بين ق.د.ك الثانوية و ق.د.ك الابتدائية . والنسبة بين الاثنتين كالنسبة بين عدد لفات الملفين . ويطلق على المحول الذى يرفع ق.د.ك الداخلة ($N_s > N_p$) اسم **المحول الرافع** ، وعلى المحول الذى يخفضها ($N_s > N_p$) اسم **المحول الخافض** . لاحظ أنه يجب أن تتذكر بعناية أن المحولات تعمل بجهود التيار المتردد وليس التيار المستمر .

عندما لا تكون الدائرة الثانوية مقفلة فإن التيار المار بها يكون صفرًا أى أنه لا يحدث فقد فى القدرة فى الملف الثانوى عندما لا يستخدم . وبالإضافة إلى ذلك فسنثبت فى الفصل التالى أنه لا يوجد فقد أيضًا فى ملف محاثة إذا كانت مقاومته صفرًا . وتتيح هذه الحقيقة لشركات توزيع القوى الكهربائية أن تحتفظ بالمحولات موصلة خلال المدينة كلها حتى ولو لم يكن هناك من يستخدم الكهرباء التى توفرها تلك الشركات . والمحولات أنفسها تستهلك النذر اليسير من الطاقة .

إلا إنه إذا سحب تيار من الملف الثانوى لتشغيل مدفأة كهربائية مثلا فإن قدرًا من الطاقة سوف يستهلك بالمدفأة . وهذه الطاقة لابد من تعويضها وتغذية الملف الابتدائى للمحول بها حتى يتمكن من توصيلها إلى الثانوى . وتحت هذه الظروف فإن فقد القدرة فى الثانوى يجعل الابتدائى يعمل كما لو كانت لديه مقاومة .

ويتعلق أحد أهم استخدامات المحولات بنقل القدرة ، فكثير من شركات الكهرباء تقوم بتوصيل الكهرباء إلى مدن قد تقع على بعد 100 km من المولدات وهذا يمثل مشكلة حقيقية . افترض أن كل شخص فى المدينة التى قوامها 100,000 نسمة يستهلك 150 W من القدرة الكهربائية وهو ما يمثل بصيلة إضاءة أو اثنتين مشتعلتين لكل شخص . وتكون القدر المستهلكة هى W (100,000)(150) وحين يكون الجهد هو 120 V (وهو الجهد المعتاد فى المنازل فى الولايات المتحدة) فإن القدرة الكلية تصبح :

$$P_{tot} = VI$$

$$(150\ W)(100{,}000) = (120\ V)\ (I)$$

$$I = 125{,}000\ A$$

وحيث أن الأسلاك الكهربائية العادية فى المنازل تستطيع أن تتحمل تيارًا يبلغ نحو 20 A بشكل آمن ودون حدوث تسخين زائد ، فإن شركة الكهرباء ستحتاج إلى ما يكافئ نحو 6500 من تلك الأسلاك لكى تحمل قدرة بهذا المستوى إلى المدينة . وعلى الرغم من إن هذا ليس مستحيلاً ، إلا أن تكلفة النحاس بمفرده ستكون باهظة للغاية . وتلتف شركات القدرة الكهربائية حول هذه المشكلة بطريقة لطيفة للغاية وذلك عند ملاحظة أن الكمية المهمة في تحديد القدرة هى VI وليست I بمفردها . ففى المثال السابق ، لو أن $V = 100{,}000\ V$ فإن :

$$(150\ W)(100{,}000) = (100{,}000\ V)\ (I)$$

$$I = 150\ A$$

وكما ترى فإن التيار المطلوب سيكون أقل بكثير فى هذه الحالة . كما أن النقل مرتفع الجهد ، قليل التيار له نتيجة هامة للغاية وهى أن الفاقد نتيجة التسخين فى كابلات (أسلاك) النقل سينخفض بشكل بالغ . ولعلك تذكر أن هذا الفقد فى القدرة يعتمد على **مربع التيار** (I^2R) بحيث أن خفض التيار ألف مرة (1000) يقلص القدرة المفقودة مليون مرة تقريبًا ! ! ولهذا تلجأ شركات القدرة الكهربائية إلى خطوط الجهد العالى (أو ما يشار إليه أحيانًا بخطوط الضغط العالى) عند نقل القدرة لمسافات بعيدة وقد يصل جهد النقل أحيانًا إلى ما يزيد على 500,000 V .

ومن الطبيعى ألا تُقدم الشركات على نقل هذا الجهد بأسلاك إلى المنازل مباشرة لأن خطر الصعق والحرائق سيكون مدمرًا . وبدلاً من ذلك فإن الشركات تلجأ إلى محولات خافضة فى المحطات الفرعية للتوزيع ومرة أخرى فى بعض المواقع المحلية لتحويل هذه الجهود إلى نحو 120 V .

كما يوجد بكثير من المنازل خطوط جهد 240 V أيضًا لأن بعض الأجهزة المنزلية الكبيرة (كمكيفات الهواء والمجففات والأفران) تعمل عادة بجهد مقداره 240 V بدلاً من 120 V وذلك لنفس السبب الذى يدفع شركات الكهرباء إلى استعمال الجهود العالية . ولابد أنك قادر على تفسير السبب فى أنه من الأفيد ماديًا تشغيل الأجهزة ذات الاستهلاك المرتفع من القدرة على جهد 240 V بدلاً من 120 V .

منظور حديث

الخواص المغناطيسية للموصلات الفائقة

لقد ناقشنا ظاهرة التوصيل الفائق فى القسم 13–18 ، كما درسنا فى الفصلين التاسع عشر والعشرين ، العلاقة بين التيارات والمجالات المغناطيسية وكيف يمكن للتيارات أن تُستحث بواسطة فيض مغناطيسى متغير . ويمكننا الآن جمع ما تعلمناه إلى بعضه البعض وفحص التبعات المغناطيسية للموصلة الفائقة .

لقد كان اختبار حلقة التيار الذى ابتكره أونيس لمعرفة ما إذا كانت مقاومة الموصل الرصاصي الفائق صفرًا أو لا كالتالي : وضعت حلقة الرصاص في مجال مغناطيسي ثم خفضت درجة حرارتها حتى 4.2 K وهي درجة الهليوم السائل (T_c للرصاص هي 7.2 K) ثم أبعدت الحلقة فائقة الموصلية عن المجال المغناطيسي مع استثارة تيار يميل إلى المحافظة على الفيض المغناطيسي الأصلي خلال الحلقة . وبمجرد خروج الحلقة من المجال المغناطيسي فإنه لا يمكن لأية ق.د.ك أن تستحث في الحلقة ومن ثم لابد للتيار من الاضمحلال أسّيا بثابت زمني مقداره $\tau_L = L/R$. وعند رصد المجال المغناطيسي الناشئ عن تيار الحلقة المستحث ، فإن المراقب لابد أن يلحظ اضمحلال التيار حتى لو كان τ_L كبيرًا جدًا (R صغيرة جدًا) لأن فترة الملاحظة يمكن أن تمتد لفترة طويلة . وكما ذكرنا في الفصل الثامن عشر فإن تيارات الحلقة قد دامت دون أى نقصان لسنوات عديدة ، مشيرة بذلك إلى أن R هي صفر في الواقع .

ثم اكتشف العالمان الألمان مايسنر و أوشنفيلد عام 1933 ، خاصية مغناطيسية جديدة ومدهشة للموصلات الفائقة ، وأصبحت تعرف **بتأثير مايسنر** . لقد وضعا كرة من الرصاص في مجال مغناطيسي خارجي ، ثم خفضا درجة حرارتها إلى ما دون T_c ، ومحتفظين بالكرة في المجال المغناطيسي . وبما أن هذه العملية لا ينشأ عنها أى تغير في الفيض المغناطيسي الخارجي ، فإن قانون فاراداي يتنبأ بأنه لن تتكون تيارات مستحثة . ومن العجيب - مع هذا - أنه عندما صارت المادة فائقة التوصيل ، فإن التيارات التى على سطح الكرة ألغت تمامًا وتلقائيًا المجال الخارجي بداخل المادة . وكان هذا دليلاً على أن الموصل الفائق يعتبر مادة ديامغناطيسية **مثالية** ; ولها إنفاذية مغناطيسية نسبية $K_m = 0$ (القسم 14-19) ومن الأهمية بمكان أن نكرر أن التيارات التى طردت المجال الخارجي في تأثير مايسنر **ليست** نتيجة للحث الذى درسناه في هذا الفصل . والمجال المغناطيسي قادر على اختراق باطن موصل ما ، حتى وإن كان موصلاً « كلاسيكيًا تامًا » . ويعد الاستبعاد التلقائي للمجال المغناطيسي الخارجي ، ظاهرة نوعية وغير متوقعة لحالة التوصيل الفائق .

ثم اكتشف فيما بعد أن تأثير مايسنر لا يرصد إلا بالنسبة لمجالات خارجية أقل من قيمة حرجة معينة . وبعبارة أخرى ، فإن المجالات المغناطيسية الخارجية القوية تستطيع تدمير حالة التوصيل الفائق والمجالات الخارجية الأقل من المجال الحرج تخفض من قيمة T_c بالنسبة لمادة ما . وبالنسبة للفلزات النقية ، فإن هذه المجالات صغيرة وتتراوح قيمها بين 5 إلى 200 mT . وقد حاول أونيس أن يمرر تيارات كبيرة في الموصلات الفائقة حتى يحصل على مجالات مغناطيسية ضخمة ، إلا إنه أدرك بسرعة أن المجالات المغناطيسية الداخلية التى تنشؤها هذه التيارات هي التى تصبح معها الموصلية الفائقة مستحيلة . على أن بعض الباحثين قد اكتشف فيما بعد أن هناك سبائك يدخل النيوبيوم في تركيبها ، يمكنها الاحتفاظ بخاصية التوصيل الفائق في مجالات تزيد على 15 T . وتعرف هذه السبائك وغيرها من السبائك ذات المجال الحرج المرتفع

بالنوع II من الموصلات الفائقة ، وقد استخدمت في توليد والاحتفاظ بمجالات مغناطيسية تزيد بكثير عما يمكن توليده بأية طرق أخرى .

ولا يزال العديد من تطبيقات الموصلية الفائقة في طور الإعداد . ومن تلك التطبيقات مولدات كهربائية وخطوط لنقل القدرة الكهربية وكلها فائقة التوصيل وذلك من أجل خفض الفاقد في القدرة بسبب وجود مقاومة . وهناك أجهزة تسمى سكويد (SQUID) (والاسم مأخوذ من الحروف الأولى للكلمات التالية : أجهزة التداخل الكمية فائقة التوصيل) وهي قادرة على قياس تغيرات المجال المغناطيسي بدقة بالغة ، وهي تستخدم حاليًا لقياس الخرائط المغناطيسية المرتبطة بنشاط المخ والقلب ووظائف الأعضاء الأخرى . كما أن هناك ما يسمى **بوصلات جوزيفسون** التي تتيح قياسات بالغة الدقة (سبعة أرقام معنوية) للجهود الكهربية ، وهي تستخدم كمفاتيح ذات سرعات عالية جدًا في العناصر المنطقية بالكومبيوتر . وسوف تنخفض تكلفة وسائل المواصلات المعلقة كالرفع المغناطيسي أو ماجليف) انخفاضًا كبيرًا ، إذا أمكن استعمال مواد فائقة التوصيل ولها درجات حرجة T_c مرتفعة حتى يمكن توليد المجالات المغناطيسية القوية المطلوبة .

ويبدو أن التوصيل الفائق سيستمر بالتأكيد في لعب أدوار عملية ومتناهية الأهمية في حياتنا . وقد ثبتت صحة هذا التوقع مع أغلب الظواهر التي توصلنا إلى فهمها نتيجة للبحوث الأساسية في الفيزياء .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) ق.د.ك المستحثة ، (ب) الفيض المغناطيسي ، (جـ) قانون فاراداى ، (د) قانون لنز ، (هـ) المحاثة المتبادلة والذاتية ،(و) الثابت الزمني الحثي ،(ز) ق.د.ك الحركية ،(ح) الجهد المتردد ،(ط) ق.د.ك العكسية ، (ى) المحول .

2 عندما تصادف حالة بسيطة تتضمن تغيرًا في الفيض الذى يتخلل ملفًا ما ، أن تشرح بطريقة وصفية كيف تسلك ق.د.ك المستحثة وأن تحدد اتجاه التيار المستحث .

3 أن تطبق قانوني فاراداى ولنز على حالات بسيطة .

4 أن تشرح كيف تسلك ق.د.ك المستحثة في محاثات متبادلة وذاتية . وأن تصف العوامل التي تؤثر على المحاثة المتبادلة .

5 أن ترسم رسمًا بيانيًا بين التيار والزمن لدائرة تتكون من ملف محاثة ومقاوم وبطارية كلها متصلة على التوالي وأن يبدأ الرسم من لحظة إغلاق الدائرة . وأن تبين الثابت الزمني الحثي على الرسم البياني .

6 أن تحسب الثابت الزمني الحثي للدائرة المذكورة في رقم (5) إذا علمت قيمتي L ، R . وأن تعين قيمة التيار في الدائرة عند أية لحظة t بعد أن يغلق المفتاح .

7 أن تشرح وصفيًا سبب وجود ق.د.ك مستحثة بين طرفي موصل يقطع خطوط مجال مغناطيسي . وأن تحسب مقدار هذه القوة الدافعة الكهربية المستحثة لسلك طوله l ويتحرك عموديًا على المجال بسرعة مقدارها v .

8 أن ترسم شكلاً تخطيطيًا لمولد تيار متردد بسيط . وأن تشرح كيف يُنتج جهدًا مترددًا جيبيًا ، وعلى أية عوامل تعتمد سعة هذا الجهد وأن ترسم رسمًا بيانيًا بين الجهد والزمن .

9 أن تشرح لماذا تعتمد ق.د.ك العكسية لمحرك ما على السرعة الزاوية لعمود المحرك .

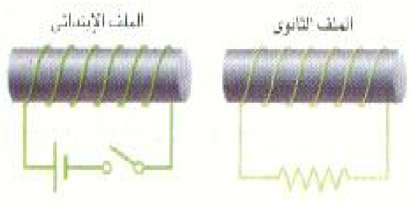
10 أن تشرح كيف يقوم المحول بتغيير الجهد المتردد . وأن تطبق معادلة المحول على مواقف بسيطة .

أسئلة وتخمينات

1 تستقر حلقتا تيار دائريتان فوق منضدة . والحلقة رقم 1 تشمل بطارية ومفتاح أما الثانية فهى مجرد عروة مقفلة من السلك . صف ما يحدث فى الحلقة رقم 2 عندما يغلق المفتاح فى الحلقة 1 فجأة ، وعندما يفتح فجأة (أ) عندما تتراكب الحلقتان و (ب) عندما لا تتراكبا . ارسم رسمًا بيانيًا للتيار مع الزمن فى كل حالة .

2 يحمل سلك طويل مستقيم تيارًا بامتداد سطح منضدة ، كما تستقر عروة مستطيلة من السلك فوق المنضدة . فإذا أطفئ التيار المار فى السلك المستقيم فجأة ، فما هوا تجاه التيار المستحث فى العروة ؟ ارسم رسمًا بيانيًا لعدة مواضع بالنسبة للسلك ، مبينًا فى كل حالة اتجاه التيار المستحث فى العروة .

3 تستقر حلقة نحاسية فوق منضدة . وكان هناك ثقب فى المنضدة عند مركز الحلقة . فإذا أُمسك مغناطيس رأسيًا بحيث كان قطبه الجنوبى مرتفعًا فوق المنضدة ثم أفلت ليسقط خلال الثقب ، فما هو وصف ق.د.ك المستحثة فى الحلقة والقوى التى تؤثر على المغناطيس .



شكل م 1-20

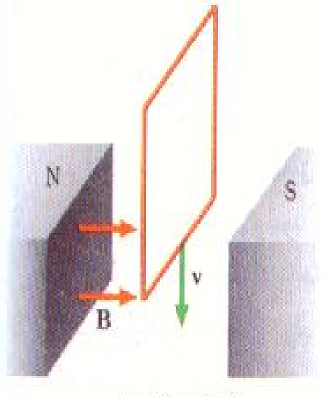
4 ماذا يحدث فى الملف الثانوى المبين بالشكل م 1-20 عندما يكون المفتاح المتصل مع دائرة الملف الابتدائى (أ) قد ضغط ليقفل و (ب) وقد جذب ليفتح ؟ أعد المسألة بالنسبة للشكل م 1-20 .

5 هب أن لديك ملفين مسطحين متماثلين تمامًا . كيف يمكن وضع الملفين بحيث تكون محاثتهما المتبادلة (أ) أكبر ما يمكن و (ب) أصغر ما يمكن ؟ وإذا وصل الملفان على التوالى بسلك مرن فكيف يجب أن يكون وضعهما حتى تكون المحاثة الذاتية : (جـ) أكبر ما يمكن ، (د) أصغر ما يمكن .

6 وضع ملف صغير بداخل ملف لولبى طويل . كيف تتغير المحاثة المتبادلة للملفين مع تغير اتجاه الملف ؟

7 وجهت أنبوبة نحاسية طويلة جدًا فى اتجاه رأسى . صف حركة قضيب مغناطيسى أسقط داخل الأنبوبة وهو فى وضع رأسى . لماذا يصل المغناطيس إلى سرعة نهائية ؟

8 ناقش إمكانية استخدام ق.د.ك . مستحثة فى الأقمار الصناعية حتى تتوافر الطاقة اللازمة للأجهزة الإلكترونية المختلفة عليه ، علمًا بأن الأقمار الصناعية تتحرك بسرعات كبيرة جدًا خلال المجال المغناطيسى للأرض .



شكل م 2-20

9 تتعرض عروة مقفلة من السلك لقوة إيقاف ضخمة عندما تسقط فى مجال مغناطيسى . برر هذه المقولة بالرجوع إلى الشكل م 2-20 . وهل يحدث نفس الشىء عندما تتأرجح قطعة مصمتة من فلز ما ومثبتة إلى خيط فى مجال مغناطيسى ؟ يعرف هذا التأثير العام بمصطلح **التخميد المغناطيسى** للحركة .

10 تستقر الحلقة المعدنية فى الشكل م 3-20 عند أحد طرفى ملف لولبى وتثبت فى ذلك الوضع ، ثم مرر تيار متردد (بواسطة ق.د.ك مترددة) خلال الملف اللولبى ، فأصبحت الحلقة ساخنة . لماذا ؟ كما أن لوحًا معدنيا يصبح هو الآخر ساخنًا لو وضع



فوق الملف اللولبى . اشرح السبب فى أن التيارات الدوامية قد أستحثت فى هذا اللوح وجعلته يسخن .

11 الحلقة المعدنية فى الشكل م 3-20 مصنوعة من النحاس ، أما الملف اللولبى فله قلب حديدى ، لكى يزيد مجاله المغناطيسى . وعندما يمر التيار فى الملف اللولبى فإن الحلقة المعدنية تطير إلى أعلى . اشرح ما يحدث . عليك بالعناية الخاصة فيما يتعلق بالاتجاهات .



شكل م 3-20

12 تبذل المحركات - عادة - شغلاً على الأشياء الخارجية . اشرح بوضوح كيف تنتقل الطاقة من التيار الكهربى إلى الجزء الدوار من المحرك .

13 اشرح كيف تحول المولدات الكهربائية الشغل الميكانيكى إلى طاقة كهربية .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

وحدات الفيض (التدفق) المغناطيسى (Φ)

$$1 \text{ Weber (Wb)} = 1 \text{ T.m}^2$$

وحدات المحاثة (M أو L)

$$1 \text{ henry (H)} = 1 \text{ V.s/A}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الفيض المغناطيسى (Φ)

الفيض المغناطيسى خلال مساحة A ما هو

$$\Phi = BA\cos\theta = B_{\perp}A$$

حيث θ هى الزاوية المحصورة بين **B** والعمود المقام على المساحة **n** .

قانون فاراداى للحث المغناطيسى

ق.د.ك المتوسطة المستحثة فى ملف به N لفة نتيجة لفيض مغناطيس متغير هى

$$\overline{\text{emf}} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

قانون لنز

يكون اتجاه ق.د.ك المتوسطة المستحثة بحيث أن التيار المار فى اتجاه ق.د.ك يخلق مجالاً مغناطيسيًا يميل إلى معارضة (أو معاكسة) التغير الحادث فى الفيض الخارجى .

خلاصة :

1 لاحظ أن Wb/s = V .

2 يمكن للفيض خلال ملف أن يتغير بثلاث طرق :

(أ) بواسطة تغيرات فى المجال **B** المتخلل للملف .

(ب) بواسطة تغيرات فى مساحة الملف .

(جـ) بواسطة تغيرات فى الزاوية θ بين الملف و **B** .

المحاثة المتبادلة (M)

المحاثة المتبادلة M بين ملفين هى ثابت التناسب بين ق.د.ك المستحثة فى الملف الثانوى ومعدل تغير التيار فى الملف الابتدائى .

$$\overline{\text{emf}}_{sec} = -M\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)_{prim}$$

المحاثة الذاتية (L)

المحاثة الذاتية لملف ما هى ثابت التناسب بين ق.د.ك المستحثة فى الملف ومعدل تغير التيار فى الملف نفسه .

$$\overline{\text{emf}} = -L\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$$

خلاصة :

1 تعتمد المحاثة المتبادلة على تصميم الملفين واتجاههما النسبى .

2 المحاثة الذاتية لملف لولبى هى : $L_{sol} = \mu_0 N^2A/l = \mu_0 n^2Al$

حيث N هى العدد الكلى اللفات و l هو طول الملف اللولبى و A هى مساحة المقطع المستعرض للملف اللولبى .

و n هى عدد اللفات لكل متر من الطول .

3 إذا كان الملف اللولبى مملوءًا بمادة ذات إنفاذية مغناطيسية نسبية K_m فإن المعادلة السابقة يجب ضربها فى K_m .

دائرة متصلة على التوالى تحتوى على مقاوم وملف محاثة و ق.د.ك

عند قفل المفتاح فإن التيار ينمو فى الدائرة متبعًا العلاقة الرياضية التالية :

$$I(t) = I_f(1-e^{-t(L/R)})$$

حيث $I_f = \mathscr{E}/R$ هو التيار النهائى فى الدائرة .

خلاصة :

1 المقدار L/R له وحدات ثوانى ويسمى الثابت الزمنى الحثى τ_L للدائرة .

2 كلما زاد الثابت الزمنى ، كلما تباطأت الدائرة فى الاستجابة للقوة الدافعة الكهربية (ق.د.ك) المطبقة . وقيم L الكبيرة و / أو قيم R الصغيرة تجعل الثابت الزمنى كبيرًا .

الطاقة المختزنة فى ملف محاثة

الطاقة المختزنة فى ملف محاثة يحمل تيارًا I هى

$$\text{الطاقة} = \frac{1}{2}LI^2$$

وإذا كانت L بوحدات هنرى والتيار بالأمبير فإن الطاقة (E) تكون بوحدات جول .

كثافة الطاقة فى مجال مغناطيسى

الطاقة فى وحدة الحجوم فى مجال مغناطيسى **B** فى الفراغ هى

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

خلاصة :

1 إذا ملئ الفراغ بمادة ذات إنفاذية مغناطيسية نسبية مقدارها K_m فإن μ_0 لابد أن تستبدل بها $K_m\mu_0$. ويسرى نفس الشىء على ملف المحاثة المحتوى على هذه المادة .

ق.د.ك الحركية

إذا تحرك موصل طوله l خلال منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم **B** وبسرعة **v** عموديًا على طوله وعلى المجال فإن ق.د.ك تستحث بين طرفيه وتساوى :

$$\text{emf} = Bvl$$

خلاصة :

1 لابد أن يمتد المجال المغناطيسى المنتظم على طول القضيب l على الأقل .

2 إذا لم تكن **v** ، **I** ، **B** فى تعامد متبادل فلابد من استخدام مركبتى **v** ، **B** المتعامدين مع **I** .

مولدات التيار المتردد

عندما يدور ملف مساحة مقطعه المستعرض A وعدد لفاته N ، بسرعة زاوية منتظمة فى مجال مغناطيسى **B** مستعرض ، فإنه يولد جهدًا مستحثًا يعتمد على الزمن بالعلاقة الآتية :

$$V(t) = V_0 \sin^2 \pi f t$$

حيث $V_0 = 2\pi f NAB$ و f هو تردد الدوران (Hz) .

خلاصة :

1 يتردد الجهد الخارج من المولد من القيمة $+V_0$ إلى $-V_0$ مارًا خلال دورة ذات طور واحد فى زمن دورى مقداره $1/f$ لدوران الملف .

المحولات

يتكون المحول من ملف ابتدائى وملف ثانوى ملفوفان (عادة) حول قلب حديدى وعندما تطبق ق.د.ك مترددة على الملف الابتدائى ، فإن ق.د.ك تستحث فى الملف الثانوى وتعطى من معادلة المحول :

$$\frac{\text{ق.د.ك الثانوية}}{\text{ق.د.ك الابتدائية}} = \frac{N_s}{N_p}$$

حيث N_s هو عدد اللفات فى الملف الثانوى ، N_p هو عدد اللفات فى الملف الابتدائى .

مسائل

القسمان 1–20 و 2–20

1 وضعت عروة مستديرة من السلك نصف قطرها 20 cm بحيث كانت متعامدة مع مجال مغناطيسى شدته 0.2 T . أوجد الفيض المغناطيسى خلال مساحة العروة .

2 وضعت قطعة من الورق المقوى مسطحة ومستطيلة الشكل ، مساحتها $240\ cm^2$ فى مجال مغناطيسى شدته 25 mT . وكان العمود المقام على سطح تلك القطعة يصنع زاوية θ مع خطوط المجال . أوجد الفيض المغناطيسى خلال المساحة إذا كان θ (أ) $0°$ و (ب) $30°$.

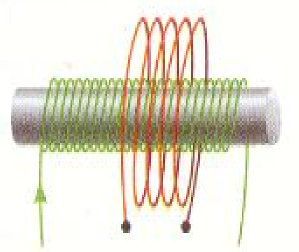
3 وضعت عروة مستديرة مسطحة مساحتها $1800\ cm^2$ فى مجال مغناطيسى شدته 30 mT . وكان العمود المقام على مساحة العروة يصنع زاوية θ مع خطوط المجال . أوجد الفيض المغناطيسى خلال المساحة إذا كانت θ (أ) $0°$ ، (ب) $90°$ ، (ب) $30°$.

4 احسب فيض المجال المغناطيسى للأرض وشدته 5×10^{-5} T خلال عروة مربعة مسطحة مساحتها $25\ cm^2$ (أ) عندما يكون المجال متعامدًا مع مساحة العروة ، (ب) عندما يصنع المجال زاوية مقدارها $30°$ مع العمود المقام على مستوى العروة و (جـ) عندما يصنع زاوية مقدارها $90°$ مع العمود المقام على المستوى .

5 تستقر عروة مستطيلة مسطحة ، مساحتها $6\ cm \times 5\ cm$ فى المستوى xy فى منطقة بها مجال مغناطيسى منتظم شدته $0.6\ T$. وكانت خطوط المجال المغناطيسى تصنع زاوية مقدارها 40° مع محور z . أوجد الفيض المغناطيسى خلال مساحة العروة .

■ 6 وضعت عروة مستديرة من السلك نصف قطرها R فى مجال مغناطيسى منتظم شدته B ، ثم أديرت حول قطرها كمحور . أوجد الفيض المغناطيسى خلال مساحة العروة كدالة فى الزمن ، إذا كان تردد الدوران هو f ، وعندما يكون محور الدوران (أ) متعامدًا مع المجال المغناطيسى و (ب) موازيًا للمجال .

■ 7 يحمل ملف لولبى مجوف به 600 لفة وطوله 60 cm ، تيارًا شدته 4 A . وقد علقت داخل المنطقة المركزية للملف عروة من السلك مساحة مقطعها المستعرض A . ما مقدار الفيض الذى يتخلل العروة إذا كانت الزاوية المحصورة بين محور العروة ومحور الملف اللولبى (أ) 90° و (ب) 60° و (جـ) 0° ؟



شكل م 4-20

■ 8 مساحة المقطع المستعرض للملف اللولبى فى الشكل م 4-20 هى A_s ومساحة المقطع المستعرض للملف رقم 1 هى A_c . عندما يمر تيار خلال الملف اللولبى فإنه ينتج مجالاً مغناطيسيًا شدته 30 mT بداخل الملف وشدته صفر تقريبًا خارجه . وليس هناك تيار فى الملف رقم 1 . احسب الفيض المغناطيسى خلال كل لفة من (أ) الملف اللولبى و (ب) الملف رقم 1 .

القسمان 3-20 و 4-20

9 تتغير شدة المجال المغناطيسى فى ملف ذى لفة واحدة ، مساحة مقطعه المستعرض $40\ cm^2$ من 6 إلى 9.6 mT على مدى 0.5 s . أوجد متوسط ق.د.ك المستحثة فى الملف .

10 يتغير الفيض المار خلال عروة مستديرة بها لفتان بمعدل 6 Wb/s . أوجد ق.د.ك المستحثة فى العروة .

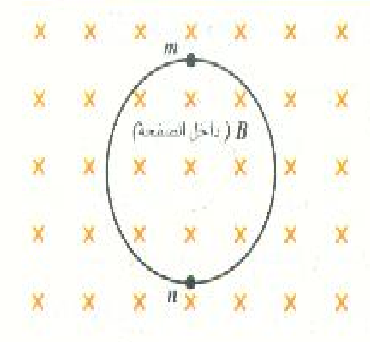
11 وضع ملف مستدير به خمس لفات وقطره 50 cm فى مجال مغناطيسى خارجى شدته 0.4 T بحيث كان المجال المغناطيسى متعامدًا مع مستوى الملف . ثم سحب الملف من المجال فى غضون 0.2 s أوجد ق.د.ك المستحثة المتوسطة خلال هذه الفترة .

12 يستقر ملف مربع به 20 لفة وطول ضلعه 4.0 cm مسطحًا فى مقابل القطب الشمالى لمغناطيس كهربى كبير . ثم أزيد التيار فى المغناطيس الكهربى ببطء بحيث ارتفاع المجال المغناطيسى من صفر إلى 0.5 T فى 4.0 s . (أ) أوجد متوسط ق.د.ك المستحثة فى الملف أثناء تغيير التيار . (ب) إذا نظرت باتجاه القطب الشمالى فهل تكون ق.د.ك فى الملف فى اتجاه حركة عقارب الساعة أم فى عكس اتجاه عقارب الساعة ؟

13 صمم ملف مسطح مربع به 200 لفة وطول ضلعه 6.0 cm بحيث يمكنه الدوران بزاوية 90° فى 0.2 s . وقد وضع الملف فى مجال مغناطيسى بحيث كان الفيض المغناطيسى خلاله صفرًا . وعندما دار الملف خلال 90° بحيث صار الفيض عند حده الأقصى ، فإن الجهد المتوسط بالملف نتيجة ق.د.ك المستحثة هو 0.4 mV . ما هى شدة المجال المغناطيسى ؟

14 وضع ملف مسطح به 400 لفة مستديرة وقطره 20 cm بحيث كان محوره موازيًا للمجال المغناطيسى للأرض . ثم حرك الملف بسرعة بحيث صار محوره متعامدًا مع المجال المغناطيسى للأرض فى فترة 0.2 s . فإذا استحثت فولطية مقدارها المتوسط 1.44 mV فى الملف ، فما هو مقدار المجال المغناطيسى للأرض ؟

15 يحاول طالب فى إحدى التجارب المعملية أن يقيس المجال المغناطيسى للأرض عن طريق توصيل طرفى عروة مربعة مسطحة أفقيًا وطول ضلعها 0.8 cm بطرفى فولتميتر حساس . ثم يحرك العروة فى اتجاه موازٍ للأرض بسرعة مقدارها 4 m/s . (أ) إذا كانت المركبة الرأسية لمجال الأرض هى $5 \times 10^{-5}\ T$ فكم تكون قراءة الفولتميتر ؟ (ب) افترض أن الطالب انتزع الملف بعيدًا فى 1.0 s ، فكم يكون مقدار ق.د.ك المتوسطة المستحثة فى العروة ؟



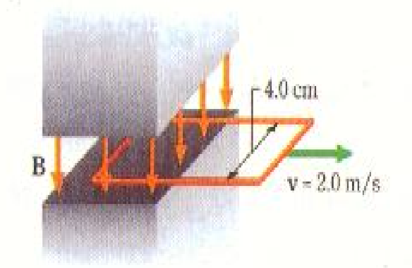
شكل م 5–20

■ 16 تبلغ مساحة عروة السلك المرنة في الشكل م 5–20 $100\ cm^2$ وهي موجودة في مجال مغناطيسي شدته $0.80\ mT$. وعندما يمسك الطالب بالعروة بشدة من النقطتين m و n ويجذبهما قطريًا إلى الخارج بشدة حتى تنطبق العروة وتصبح خطًا مستقيمًا في $0.12\ s$. ما هو متوسط ق.د.ك المستحثة في الملف أثناء هذه العملية ؟

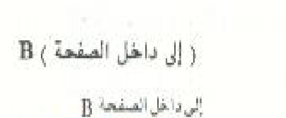
■ 17 تستحث ق.د.ك مقدارها $64\ \mu V$ في العروة المبينة في الشكل م 5–20 إذا أديرت فجأة حول محور يمر بالنقطتين m و n بزاوية مقدارها $90°$ في $0.16\ s$. كانت مساحة العروة $40\ cm^2$. (أ) ما هو مقدار المجال المغناطيسي ؟ (ب) ما هو متوسط ق.د.ك إذا أدير الملف $180°$ في نفس الفترة الزمنية ؟

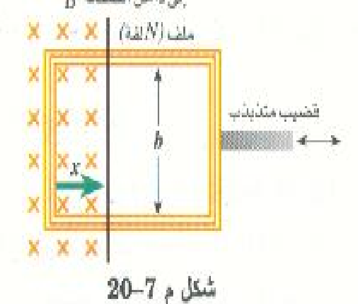
■ 18 ملف لولبي به 400 لفة وقطره $12\ cm$ ينتج بداخله مجال مغناطيسي شدته $0.3\ T$. ما هي الفترة الزمنية التي يجب أن يتغير المجال داخل الملف فيها من هذه القيمة إلى الصفر إذا كان مقدار متوسط ق.د.ك المستحثة خلال هذه الفترة الزمنية $6\ kV$.

■ 19 وضع ملف دائري مسطح به 60 لفة من السلك في مجال مغناطيسي بحيث صنع العمود المقام على مستوى الملف زاوية مقدارها $40°$ مع خطوط المجال المغناطيسي . وعندما زيد مقدار المجال المغناطيسي بالتدريج من 0.2 إلى $0.7\ mT$ في زمن قدره $0.5\ s$ فإن ق.د.ك مقدارها $90\ mV$ تستحث في الملف . ما هو الطول الكلي للسلك المستخدم في صناعة هذا الملف ؟



■ 20 جُذبت العروة السلكية المبينة في الشكل م 6–20 إلى خارج المجال المغناطيسي بسرعة ثابتة . فإذا كان المجال منتظمًا وشدته $2.0\ mT$ في المنطقة المبينة . وصفر فيما عدا ذلك ، (أ) ما هي ق.د.ك المستحثة في العروة و (ب) ما هو اتجاهها .





شكل م 7–20

■ 21 كثيرًا ما تستخدم أجهزة استشعار مغناطيسية للكشف عن الذبذبات الصغيرة ويتم ذلك ـ مثلاً ـ بتوصيل طرف قضيب متذبذب بملف يتأرجح داخل وخارج مجال مغناطيسي منتظم **B** كما هو مبين في الشكل م 7–20 . إثبت أن ق.د.ك المستحثة في الملف يمكن التعبير عنها بدلالة السرعة التي يتحرك بها طرف القضيب المتذبذب v ؛ $emf = NBbv$.

■ 22 تبلغ قيمة متوسط المجال الذي ينتج داخل ملف لولبي ما $0.8\ T$. وقد تم لف ملف ثانوي به 120 لفة فوق الملف اللولبي . فإذا كانت مساحة المقطع المستعرض للملف اللولبي $0.6\ cm^2$. ما هو مقدار ق.د.ك المستحثة في الثانوي إذا انخفض المجال داخل الملف اللولبي من قيمته المذكورة إلى الصفر في $0.020\ s$ ؟

■ 23 يدخل قضيب مغناطيسي ويخرج داخل ملف به 240 لفة ، ويحتويه الملف بإحكام . وعندما رفع المغناطيس إلى أعلى ثم أدخل بالملف في غضون $0.36\ s$ فإن ق.د.ك متوسطة مقدارها $0.40\ V$ تستحث في الملف . فإذا كانت مساحة القطع المستعرض للمغناطيس $3.0\ cm^2$ ، أوجد مقدار المجال المغناطيسي B .

■ 24 في الشكل م 4–20 كان نصف قطر الملف رقم 1 هو b ونصف قطر الملف الولبي هو a . والملف اللولبي أطول كثيرًا في الواقع عما هو مرسوم في الشكل (أ) . ما مقدار ق.د.ك المستحثة في الملف رقم 1 إذا كان المجال المغناطيسي في الملف

اللولبي يتغير بمعدل مقداره 0.040 T/s ، علمًا بأن هذا الملف به N لفة ، بينما بالملف اللولبي n عروة في المتر من طوله ؟ (ب) ما هي ق.د.ك المستحثة في الملف إذا أدخل قضيب حديدي إنفاذيته المغناطيسية النسبية هي $K_m = 200$ ، إلى داخل الملف اللولبي فملأه تمامًا ؟

25 يتزايد التيار المار في ملف لولبي ذي قلب هوائي بمعدل مقداره 1.5 A/s . وكان بالملف اللولبي 10^6 لفة لكل متر من طوله ، بينما كانت مساحة المقطع المستعرض له هي $2.0\ cm^2$ ..ثم أضيفت لفات ملف ثانوي مقدارها 10^4 لفة فوق لفات الملف اللولبي . ما هو مقدار ق.د.ك المستحثة في الملف الثانوي ؟

26 استُخدم نفس القلب الحديدي لف ملفين بشكل محكم وجنبًا إلى جنب على ذلك القلب . ومساحة المقطع المستعرض لكلا الملفين $5.0\ cm^2$. وعندما يمر تيار مقداره 1.8 A في الملف الابتدائي يتكون مجال مغناطيسي مقداره $B = 0.40\ T$ في القلب . وكان الملف الثانوي يحتوي على 120 لفة . (أ) ما هو مقدار ق.د.ك المستحثة في الثانوي إذا انخفض التيار في الابتدائي بانتظام من هذه القيمة إلى الصفر في زمن مقداره 0.050 s ؟ (ب) ما هي المحاثة المتبادلة للملفين ؟

القسم 5–20

27 بلغت محاثة ملف لولبي هوائي القلب وطوله 25 cm وقطره 2.0 cm ، 0.2 mH . ما هو عدد اللفات في هذا الملف اللولبي ؟

28 يرتفع التيار في ملف لولبي محاثته 4 mH من 0.4 A إلى 2.0 A في 0.4 s . ما هو متوسط ق.د.ك المستحثة في الملف أثناء هذا الزمن ؟

29 ما هو مقدار الفيض المغناطيسي خلال كل لفة من لفات الملف البالغة 400 لفة ومحاثته 8 mH عندما يمر به تيار مقداره 12 mA ؟

30 لدينا ملف لولبي به 500 لفة ونصف قطره 2.0 cm وطوله 25 cm . (أ) ما هي محاثة الملف اللولبي ؟ (ب) أوجد المعدل الذي يتغير به التيار المار في الملف اللولبي حتى يؤدي إلى ق.د.ك مقدارها 72 mV .

31 بالإشارة إلى المسألة رقم 30 ، أوجد معدل تغير الفيض المغناطيسي خلال مساحة المقطع المستعرض لملف لولبي في اللحظة التي تبلغ فيها ق.د.ك 72 mV .

32 ما هو معدل تغير التيار في ملف محاثة مقداره 40 mH عندما تكون ق.د.ك المستحثة عبر الملف هي 0.020 V ؟

القسم 6–20

33 إثبت أن وحدات الثابت الزمني الحثي $\tau = L/R$ هي الثواني .

34 وصِّل ملف محاثته 40 mH ومقاومته $16\ \Omega$ ببطارية قوتها 24 V وذات مقاومة داخلية مهملة . ما هو الثابت الزمني للدائرة ؟

35 وصلت بطارية قوتها 6 V على التوالي مع مقاوم وملف محاثة . وكان الثابت الزمني للدائرة $500\ \mu s$ والتيار الأقصى بها 360 mA . ما هي قيمة المحاثة ؟

36 طبق فرق جهد مقداره 60 V فجأة على ملف محاثته 15 mH ومقاومته $10\ \Omega$ وذلك بقفل مفتاح . أوجد (أ) التيار الأولي والمعدل الأولي لتغير التيار . (ب) مقدار التيار عندما يكون معدل تغير التيار هو 2000 A/s و (جـ) التيار النهائي ومعدل تغير التيار .

37 وصل ملف محاثة 30 mH على التوالي مع مقاوم $10\ \Omega$ وبطارية 9 V . وقد قفل المفتاح عند اللحظة $t = 0$. أوجد فرق الجهد عبر المقاوم (أ) عندما $t = 0$ و (ب) بعد زمن يساوي نصف الثابت الزمني و (جـ) بعد مرور زمن يساوي الثابت الزمني .

38 أوجد فرق الجهد عبر ملف المحاثة في المسألة رقم 37 (أ) عندما $t = 0$ و (ب) بعد مرور ثلث الثابت الزمني و (جـ) بعد مرور ثابت زمني واحد .

39 وصل ملف محاثة به 300 لفة ونصف قطره 4 cm وطوله 25 cm على التوالى مع مقاوم 1 kΩ وبطارية 12 V . أوجد التيار المار فى الدائرة . (أ) بعد ثابت زمنى واحد و (ب) بعد مرور ثابتين زمنيين .

القسم 20-7

40 ما مقدار الطاقة المختزنة فى ملف محاثة 50 mH عند اللحظة التى يكون التيار فيها 3 A ؟

41 احسب الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسى لملف لولبى به 400 لفة ، يمر فيها تيار مقداره 2 A ، يخلق فيضًا مغناطيسيًا 0.4 mWb فى كل لفة .

42 ملف محاثة 2 mH يحمل تيارًا مقداره 0.5 A . ما مقدار الطاقة المختزنة فى مجال ملف المحاثة ؟ ما مقدار الفاقد فى الطاقة إذا كانت مقاومة الملف 2 Ω ؟

43 محاثة ذاتيى مقدارها 24 mH تحمل تيارًا مقداره 3 A . (أ) ما مقدار الطاقة المختزنة فى المحاثة ؟ (ب) وإذا كانت هذه الطاقة مختزنة فى $3.0\ cm^3$ من الهواء فما هى القيمة المتوسطة للمجال المغناطيسى B فى الهواء ؟

44 ملف لولبى ملفوف حول قلب خشبى بانتظام بحيث كان حجم الملف اللولبى من الداخل $24\ cm^2$. وعندما يمر تيار مقداره 0.50 A فى الملف اللولبى فإن المجال المغناطيسى بداخله يكون 0.80 T . (أ) ما هو مقدار الطاقة فى وحدة الحجوم من المجال المغناطيسى ؟ (ب) ما مقدار الطاقة المختزنة فى الملف اللولبى ؟ (جـ) ما هى المحاثة الذاتية للملف اللولبى ؟

45 وصل مقاوم 10 Ω وملف محاثة 20 mH على التوالى مع بطارية 12 V . ما مقدار الطاقة المختزنة فى ملف المحاثة عندما (أ) يصل التيار إلى حده الأقصى ، (ب) يمر ثابت زمنى واحد بعد قفل المفتاح ، و (جـ) بعد مرور ثابتين زمنيين بعد قفل المفتاح ؟

القسم 20-8

46 تسير سيارة بسرعة مقدارها 25 m/s فى منطقة تبلغ المركبة الرأسية للمجال المغناطيسى للأرض فيها $3.0 \times 10^{-5}\ T$. ما هو مقدار فرق الجهد المستحث بين طرفى أحد محورها التى طول كل منها 2.0 m ؟

47 تتحرك شاحنة جنوبًا بسرعة مقدارها 30 m/s فى موقع تبلغ فيه المركبة الرأسية للمجال المغناطيسى للأرض $5.0\ \mu T$. أوجد ق.د.ك المستحثة فى الهوائى الرأسى للشحنة والذى يبلغ طوله 1.2 m .

48 أسقط قضيب معدنى طوله متر واحد يتخذ اتجاه شرق - غرب من ارتفاع 15 m على مكان كانت فيه المركبة الأفقية للمجال المغناطيسى للأرض $5.0 \times 10^{-5}\ T$. ما مقدار ق.د.ك المستحثة بين طرفى القضيب قبل أن يصطدم بالأرض مباشرة ؟

49 تحلق طائرة معدنية تبلغ المسافة بين طرفى جناحها 30 m أفقيًا باتجاه الغرب وبسرعة مقدارها 250 m/s فى موقع تبلغ فيه المركبة الرأسية السفلى للمجال المغناطيسى للأرض $0.8 \times 10^{-4}\ T$. (أ) ما هو فرق الجهد بين طرفى الجناحين ؟ ، (ب) أى طرفى الجناحين يكون سالبا ، الجنوبى أم الشمالى ؟ ، (جـ) هل يمكن قياس هذا الجهد ؟ وإذا كان ممكنًا فكيف ؟

50 يخطط مهندس لكى ينير محطة قطارات باستخدام ق.د.ك المستحثة فى محاور القطارات التى تجرى على القضبان . (أ) إذا كانت المركبة الرأسية إلى أسفل للمجال المغناطيسى للأرض 0.6 G والمسافة بين القضبان 1.5 m ، فما هو مقدار ق.د.ك المتولدة بين القضيبين عند مرور قطار يسير بسرعة مقدارها 40 m/s ؟ (ب) هل يمكن استغلال هذا الجهد على القطار نفسه ؟ (جـ) وهل يمكن استغلاله فى محطة القطارات الواقعة عند الطرف البعيد للقضبان ؟ اشرح إجاباتك على الجزءين (ب) و (جـ) .

51 يستقر قضيب معدنى طوله 1 m داخل طائرة حيث يوجد مجال مغناطيسى شدته $6.0 \times 10^{-3}\ T$. ويميل محور القضيب بزاوية مقدارها 60° مع اتجاه المجال ويتحرك القضيب متعامدًا مع الطائرة بسرعة مقدارها 1.6 m/s . ما هى ق.د.ك المستحثة بين طرفى القضيب ؟

▪ 52 افترض أن السرعة التي تجذب بها العروة المذكورة في الشكل م 6–20 هي $v = 3$ m/s . وكان عرض العروة $d = 5$ cm ، والقيمة الثابتة للمجال المغناطيسي هي $B = 10$ G بين القطبين وصفر في أي موقع آخر . (أ) أوجد ق.د.ك المستحثة في العروة . (ب) إذا كانت مقاومة العروة هي $R = 8\ \Omega$ فما هو التيار المار فيها عند اللحظة المبينة ؟ (جـ) ما مقدار القوة الواجب جذب العروة بها حتى تظل سرعة حركتها ثابتة ؟

القسمان 9–20 و 10–20

53 يدور ملف مكون من 300 لفة مساحة كل منها 5.0 cm² بتردد مقداره 120 لفة في الثانية وفي مجال مغناطيسي شدته 0.040 T . اكتب الجهد المستحث في الملف على الصورة $V = V_0 \sin \omega t$.

54 ملف منفرد يدور في مجال مغناطيسي ويخلق جهدًا مقداره $V = 40 \cos (1000\,t)$. ما هو تردد دوران الملف وأقصى جهد ناتج عن هذا ؟

55 يدور ملف به 150 لفة ومساحته 100 cm² بتردد مقداره 45 rev/s في مجال مغناطيسي . فإذا كانت ق.د.ك المستحثة القصوى في الملف هي 5.0 V . فما هو مقدار شدة المجال المغناطيسي ؟

56 يدور ملف مولد به 300 لفة ومساحته 400 cm² في مجال مقداره 40 mT ما هي السرعة مقدرة بعدد اللفات في الثانية - التي يجب أن يدور بها الملف لتوليد جهد أقصى مقداره 2.0 V ؟

67 يدور ملف مربع الشكل طول ضلعه 20 cm وبه 100 لفة حول محور رأسي بسرعة تبلغ 2400 rev/m في موقع كانت المركبة الأفقية للمجال المغناطيسي للأرض فيه 2 G . أوجد أقصى ق.د.ك مستحثة في الملف بسبب المجال المغناطيسي للأرض .

▪ 58 يدور الملف المستطيل المحتوى على 500 لفة وأبعاده 10 cm × 20 cm لمولد ما بسرعة 120 rev/s في مجال مغناطيسي مقداره 0.8 T . (أ) ما هي أقصى ق.د.ك مستحثة في الملف ؟ ، (ب) ما هي القيمة اللحظية لهذه القوة الدافعة الكهربية في الملف عند $t = (\pi/30)$ s ؟ إذا اعتبرنا أن ق.د.ك تكون صفرًا عند $t = 0$ فما هي ، (جـ) أصغر قيمة للزمن t عندما تصل ق.د.ك إلى أقصى قيمة لها ؟

59 تبلغ مقاومة ملف في محرك ما 5 Ω . وعندما يعمل المحرك عند السرعة المقررة له فإنه يسحب تيارًا مقداره 4.0 A من المصدر الذي جهده 120 V . (أ) ما مقدار ق.د.ك المضادة بالمحرك ؟ (ب) ما هو التيار الذي قد يسحبه المحرك إذا توقف عن الدوران ؟

60 يعمل محرك مقاومة ملفه 20 Ω باستخدام مصدر للجهد مقداره 240 V . وعندما يعمل المحرك بأقصى سرعة له فإن ق.د.ك المضادة تكون 105 V . أوجد التيار المار في الملف (أ) عندما يدار المحرك لأول مرة و (ب) عندما يصل المحرك إلى أقصى سرعة له .

61 إذا كان التيار المار في المحرك المذكور في المسألة السابقة هو 6 A . فما هي ق.د.ك المضادة في تلك الحظة ؟

▪ 62 يكون التيار المار في ملفات محرك ما 12 A عندما يدار لأول مرة ويكون 4 A عندما يدور عند أقصى سرعة له . ويعمل هذا المحرك بجهد مقداره 120 V . أوجد ق.د.ك المضادة في الملف وكذا مقاومة الملف .

▪ 63 تحتاج المحركات الكبيرة إلى نحو دقيقة حتى تصل إلى سرعتها بعد بدء التشغيل وقد كانت مقاومة أحد هذه المحركات 1.2 Ω ويسحب تيارًا مقداره 10 A من مصدر جهده 120 V في المعتاد . (أ) ما مقدار المقاومة (وتسمى مقاومة البدء) الواجب توصيلها على التوالي مع المحرك إذا لم يكن يراد له أن يسحب أكثر من 20 A عند بدء التشغيل ؟ (ومن الطبيعي أن تزال هذه المقاومة بعد ذلك) . (ب) ما هي ق.د.ك العكسية لهذا المحرك عندما يعمل عند السرعات المعتادة ؟

القسم 11-20

64 يقوم محول معين في جهاز راديو بتحويل الجهد المتردد من 120 V إلى 6 V . (أ) ما هي النسبة بين اللفات N_p / N_s بالنسبة لهذا المحول ؟ (ب) وصِّل هذا المحول بطريق الخطأ عكسيًا . ما هو الجهد عند الخرج بالتقريب قبل أن يحترق كل شيء ؟

65 يستعمل محول في أحد إعلانات النيون لكي يحول الجهد المتردد من 120 V إلى 16,800 V . (أ) ما هي النسبة بين عدد اللفات N_p / N_s للمحول ؟ (ب) إذا وصِّل المحول بطريقة عكسية (أي 120 V متصلة بالملف الثانوي) فما هو الجهد الذي يظهر بالملف الابتدائي ؟

66 يقوم محول في محطة توزيع بخفض الجهد المتردد من 36.000 V إلى 2400 V . وكان بالملف الابتدائي 15.000 لفة . (أ) ما هو عدد لفات الملف الثانوي ؟ (ب) إذا كان التيار في الملف الثانوي هو 500 A . فما هو التيار في الملف الابتدائي ؟ اعتبر أنه لا يوجد فقد في القدرة .

67 التيار الابتدائي في محول مثالي (لا يوجد فقد في القدرة) هو 15,0 A عندما يكون الجهد الابتدائي 90 V . احسب الجهد عبر الثانوي عندما يكون التيار المسحوب منه هو 0.9 A .

68 تستعمل آلة لحام تيارًا مقداره 360 A . ولهذه الآلة محول بملفه الابتدائي 720 لفة ويسحب تيارًا مقداره 4.0 A من خط للقوى يوفر 240 V . (أ) ما عدد اللفات في الثانوي ؟ (ب) ما هو الجهد الخارج عبر الثانوي ؟ اعتبر عدم وجود فقد في القدرة في المحول .

■ 69 يحتوي الملف الابتدائي لمحول ما على 200 لفة والثانوي على 80 لفة ، ويوصل ملفه الابتدائي بخط قدره جهده 120 V . وكان التيار في الابتدائي هو 0.25 A عند توصيل بصيلة إضاءة بالثانوي . أوجد مقاومة البصيلة . اعتبر عدم وجود فقد في القدرة في المحول .

مسائل إضافية

■ 70 يحمل ملف لولبي به 500 لفة وطوله 25 cm ونصف قطره 2.0 cm تيارًا مقداره 4 A . وقد تم لف ملف آخر به 5 لفات بإحكام حول الملف اللولبي بحيث كان له نفس القطر الذي للملف اللولبي . (أ) أوجد التغير في الفيض المغناطيسي خلال الملف و (ب) مقدار ق.د.ك المستحثة المتوسطة في الملف عندما يزيد التيار في الملف اللولبي إلى 10 A في زمن قدره 1.2 s .

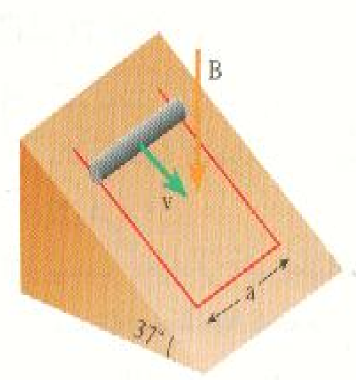
■ 71 تستحث ق.د.ك مقدارها 20 mV في ملف لولبي به 400 لفة في اللحظة التي يكون فيها التيار خلال الملف 4 A ويتغير بمعدل يبلغ 12 A/s . احسب الفيض المغناطيسي خلال كل لفة من لفات الملف الابتدائي .

■■ 72 ملف لولبي طويل ذو قلب حديدي ويحتوي على 2400 لفة ومساحة مقطعه المستعرض $4.0\ cm^2$. وعندما يمر تيار مقداره 4.0 A خلال الملف اللولبي فإن المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي يصبح $B = 0.60\ T$. (أ) احسب ق.د.ك المستحثة المتوسطة في الملف اللولبي إذا انخفض التيار إلى الصفر في زمن قدره 0.2 s . (ب) ما هي المحاثة الذاتية للملف اللولبي ؟

■■ 73 تتصل محاثتان L_1 و L_2 معًا على التوالي . إثبت أن المحاثة المكافئة للمجموعة L_e تعطى بالعلاقة $L_e = L_1 + L_2$.
تلميح : فرق الجهد الكلي عبر ملفي المحاثة هو مجموع ق.د.ك المستحثتين في كل من الملفين ، ومعدل تغير التيار هو نفسه في كل من ملفي المحاثة .

■■ 74 إثبت أن المحاثة المكافئة لملفي المحاثة L_1 و L_2 المتصلين على التوازي يعطى بالعلاقة $1/L_e = 1/L_1 + 1/L_2$. تلميح : يتطلب قانون كيرتشوف أن تكون القوتان الدافعتان الكهربيتان متساويتين وأن يكون التيار الكلي هو مجموع التيارين المنفصلين .

75 ينزلق القضيب الهوائي المعدني في الشكل م 8-20 نحو أسفل المنحدر بينما يتواجد مجال مغناطيسي هو $B = 2.5\ T$. (أ) أوجد ق.د.ك المستحثة عندما تكون سرعته $V = 20\ m/s$. (ب) فإذا كانت مقاومة العروة $R = 25\ \Omega$. فما هو التيار المار في العروة ؟ (جـ) هل يمر التيار في اتجاه حركة عقارب الساعة أم ضد حركتها ؟ (د) ما مقدار القوة المؤثرة في اتجاه أعلى للمنحدر ، على القضيب بسبب التيار وفي وجود المجال المغناطيسي ؟ (هـ) هل تميل هذه القوة إلى الإبطاء أم الإسراع في حركة القضيب ؟

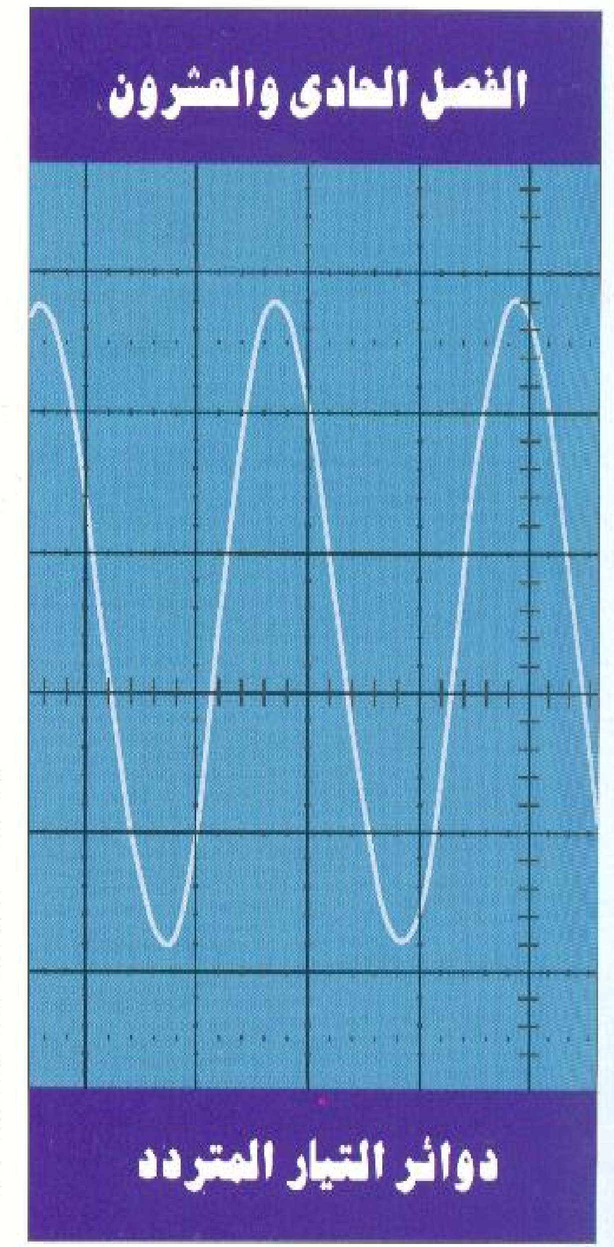


شكل م 8-20

76 بالنسبة للمسألة السابقة الموضحة في الشكل م 8-20 أوجد السرعة النهائية للقضيب عندما ينزلق بدون احتكاك إلى أسفل المنحدر . تبلغ كتلة القضيب $m = 36\ g$ ومقاومة العروة صفر تقريبًا ، أما مقاومة القضيب فهي $25\ \Omega$.

77 للعروة المربعة المبينة في الشكل م 2-20 مقاومة مقدارها $20\ \Omega$ ، وطول ضلعها $4.0\ cm$ وكتلتها $15\ g$. فإذا كان مقدار المجال المغناطيسي هو $2.4\ T$ بين القطبين وصفر فيما عدا ذلك ، فأوجد السرعة النهائية للعروة عند دخولها المنطقة الواقعة بين القطبين . اعتبر أن العروة تقع في الموضع المبين عندما تكون قد وصلت إلى سرعتها النهائية .

78 تبلغ مقاومة سلك من النحاس (رقم 10) $5.2 \times 10^{-3}\ \Omega/m$ ويستطيع هذا السلك حمل تيار مقداره نحو $30\ A$ فقط دون حدوث تسخين زائد . وترغب إحدى شركات توزيع القوى الكهربائية في استخدام هذا النوع من السلك لتوصيل قدره تبلغ $36\ MW$ إلى مدينة تبعد $50\ km$ من محطة توليد . ما هي نسبة القدرة المرسلة من المحطة والتي تفقد عبر خطوط النقل إذا كان الجهد المنقول هو (أ) $240\ V$ و (ب) $12,000\ V$. اعتبر أن الحد المسموح به وهو $30\ A$ لا يتم تجاوزه .



لقد انصب اهتمامنا الرئيسى فى الفصول القليلة السابقة على التيارات المستمرة ، أى التى تسرى الشحنات فيها بشكل دائم فى نفس الاتجاه . على أننا درسنا فى الفصل العشرين أن مصدر الجهد ذا القطبية المتردد ، يمكن الحصول عليه عند إدارة ملف فى مجال مغناطيسى . ومثل مصدر الجهد المتردد هذا هو الذى ينتج التيارات المترددة . وهى بدورها ذات أهمية عظيمة . وسوف ندرس فى هذا الفصل كيفية سلوك هذه التيارات عندما تسرى خلال مقاومات ومكثفات ومحاثات .

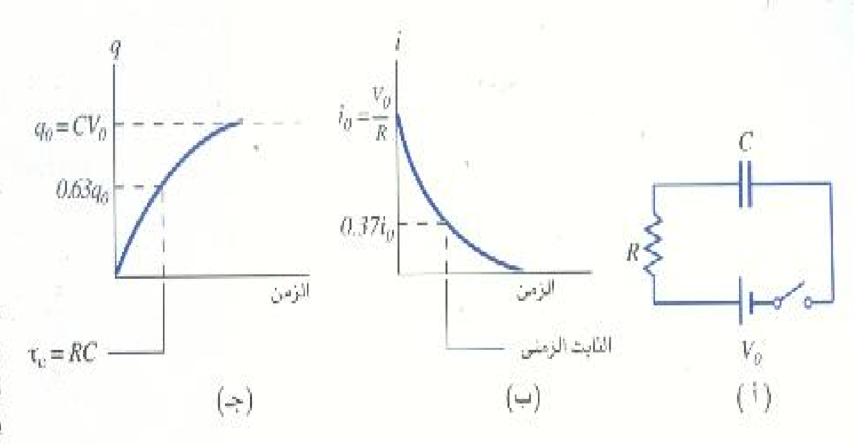
21-1 شحن وتفريغ مكثف

إن فهم سلوك دوائر التيار المتردد يستدعى أن نعرف كيف يستجيب التيار المار خلال عناصر الدائرة للتغيرات المستمرة فى مصدر ق.د.ك ونعرف أنه ليس هناك تأخر زمنى بين تطبيق جهد V عبر مقاوم نقى وتكون تيار $I = V/R$ خلال المقاوم . وبعبارة أخرى فإن ، **التيار والجهد فى مقاوم ما يخضعان لقانون أوم لحظيًا .**

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} \qquad \text{(مقاوم نقى)} \qquad (21\text{-}1)$$

لقد درسنا فى الفصل السابق الطريقة التى ينمو التيار بها مع الزمن عندما يغلق المفتاح الذى يوصل مصدر الجهد بملف محاثة . وقد وجدنا أن هناك تأخيرًا فى الزمن يمر قبل أن يصل التيار إلى القيمة النهائية التى يحددها قانون أوم . ولعلنا لذلك نتوقع أنه إذا كان الجهد المطبق على الدائرة فى تغير دائم ، فإن التيار هو الآخر سيظل « يطارد »

الجهد ، وعليه فإن قانون أوم لن يكون متبعًا فى كل لحظة . وهذا فـى الواقـع هـو لـب المسألة وسنتابع الموضوع بتفصيل أكبر فى أقسام تالية .



شكل 1-21:
يعتبر الثابت الزمنى τ_c مقياسًـا مناسـبًا للزمن الذى يستغرقه مكثف لكى يشحن أو يفرغ .

والمكثف هو عنصر الدائرة الوحيدة الذى لا زلنا فى حاجة لفحص سلوكه المعتمد على الزمن . فالمكثف كما نعلم لا يسـمح بمـرور التيـار المسـتمر . إلا أن شحـن وتفريـغ مكثـف مـا يستلزم حركة شحنات من وإلى لوحى المكثف . ونقل هـذه الشحنـات عـبر الدائـرة المحتويـة على مكثف ، يمثل تيارًا انتقاليًا . وسنفحص هذا السلوك بالرجوع إلى الدائرة البسيطة المبينـة فى الشكل 1-21 (أ) . افترض أن المفتاح مفتوح فى البدايـة وأنـه لا توجـد شحنـات على المكثف الذى يرمز لسعته بالرمز C . ونأمل فى معرفة ما يحدث عند إغلاق المفتاح فجأة .

عند إغلاق المفتاح فإن البطارية ستحاول إرسال شحنات فى اتجاه مع حركة عقارب الساعة حول الدائرة . وبما أنه لم تكن هناك أية شحنات علـى المكثـف فـى البدايـة ، فإن التيار i سيتحدد بالمقاوم R فحسب ومن ثم ، فإنه عقب إغلاق المفتـاح مباشـرة (عنـد اللحظة $t = 0$) سيكون التيار $i_0 = V_0 / R$ كما فى الشكل (ب) . على أنه بمرور الوقت ، يأخذ التيار فى النقصان كلما تراكمت الشحنة على لوحى المكثف وذلك لأن هذه الشحنة تخلق فرق جهد عبر C ، معاكسًا لجهد البطارية . ولابـد أن ينخفـض التيـار إلى الصفـر عندما تصبح شحنة المكثف فى النهاية $q_t = CV_0$.

ويوضح الشكل 1-21 (ب) الأسلوب الدقيق الذى يتصرف من خلاله التيار المـار فـى الدائرة . ويسمى المنحنى البيانى الذى يتبعه التيار **منحنى اضمحـلال أُسّى** . والصيغـة الرياضية لـهذا السلـوك هى :

$$i(t) = i_0 e^{-t/RC} \tag{21-2}$$

حيث $i_0 = V_0 / R$. وحاصل الضرب RC لـه وحـدات زمـن **ويسمى الثـابت الزمنـى السعوى** τ_C . (تأكد من أنك تستطيع إثبات أن $\Omega.F = s$) . عنـد اللحظـة $t = \tau_C$ فإن التيار يكون قد هبط إلى $1/e = 0.37$ من قيمته الابتدائية . أما عند $t = 2\tau_C$ فالتيار يصل إلى $0.135 = \left(1/e^2\right)$ من قيمته i_0 ، وهكذا .

ويظل المكثف يتلقى شحنات طالما كان هناك تيار يمر فـى الدائـرة . وعندمـا يتوقـف التيار فى النهاية ، فإن معنـى ذلـك أن الجـهد عـبر المكثـف قـد أصبـح مسـاويًا لجـهد

البطارية ، أو $V_C = q_f/C = V_0$ ، حيث q_f هي الشحنة النهائية على المكثف . وتغير الشحنة على المكثف مع الزمن يمكن تمثيله بيانيًا بالشكل 1-21 (جـ) أما الصيغة الرياضية لهذا الرسم البياني فهي :

$$q(t) = q_f(1 - e^{-t/\tau_C}) = CV_0(1 - e^{-t/\tau_C}) \qquad (21\text{-}3)$$

يلاحظ أن هذا السلوك مطابق لسلوك تنامي التيار في ملف محاثة (المعادلة 6-20) . ويلعب الثابت الزمني السعوي RC للشحنة نفس الدور الذي يلعبه الثابت الزمني الحثي L/R بالنسبة لتيار ملف المحاثة . فكلما كان المقدار RC كبيرًا كلما استغرق الأمر وقتًا أطول حتى « يمتلئ » المكثف بالشحنة ويمكن إدراك هذا المعنى بطريقة وصفية . إن القيمة الأكبر للسعة C تتطلب المزيد من الشحنة المتراكمة لبناء كل فولت واحد من الجهد عبر لوحي المكثف كما أن قيم R الكبيرة تقوم بدور أكبر في تحديد قيمة التيار ومن ثم تحدد المعدل الذي يمكن أن توضع به الشحنات على لوحي المكثف .

عندما يوصل مقاوم R عبر مكثف مشحون مباشرة ، فإن ذلك المكثف سيفرغ شحنته خلال المقاوم . إذا اعتبرنا فرق الجهد الابتدائي بين لوحي المكثف هو V_0 فإن التيار الذي يسري من المكثف عندما يأخذ في التفريغ سوف يتغير بالطريقة المبينة في الشكل 1-21 (ب) . ويسلك تيار تفريغ المكثف نفس سلوك تيار الشحن . وتتناقص الشحنة على المكثف أسيًا أيضًا بعد أن يتم التوصيل . هل يمكنك إثبات أن الجهد عبر المكثف لابد أن يتناقص بنفس الطريقة التي تتناقص بها الشحنة ؟ وفيما يلي المعادلات الخاصة بالمقدارين $q(t)$ و $V(t)$:

$$q(t) = q_0 e^{-t/RC} \qquad (21\text{-}4)\ (\text{أ})$$

$$V(t) = V_0 e^{-t/RC} = \frac{q_0}{C} e^{-t/RC} \qquad (21\text{-}4)\ (\text{ب})$$

ويعني هذا أن المكثف يفرغ نحو خمسة أثمان شحنته خلال ثابت زمني واحد .

مثال توضيحي 1-21

يشحن مكثف في معظم أجهزة التليفزيون إلى فرق جهد يبلغ نحو 20,000 V . ويوصل مقاوم يسمى المقاوم التجزيئي عبر لوحي المكثف كإجراء وقائي حتى لا يحدث تفريغ للمكثف بعد أن يكون الجهاز قد أطفئ . افترض أن المقاومة التجزيئية مقدارها $10^6\ \Omega$ وأن $C = 10\mu F$. كم يمضي من الوقت بعد إطفاء الجهاز قبل أن يصبح لمس المكثف آمنًا ؟

استدلال منطقي : الثابت الزمني لهذه الدائرة هو

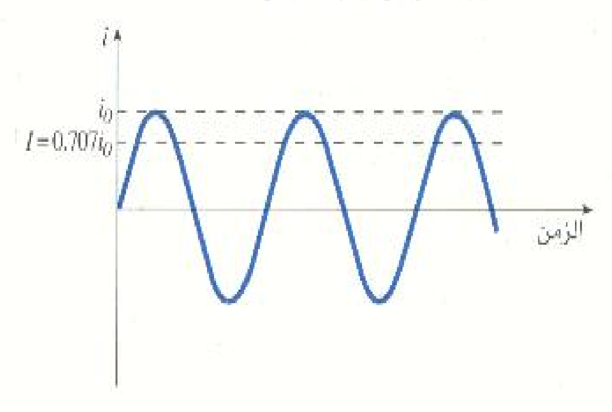
$$\tau_C = RC = (10^6\ \Omega)(10^{-5}\ \text{F}) = 10\ \text{s}$$

وكنوع من التخمين ، قد نفترض أنه سيكون آمنًا أن نلمس المكثف بعد مرور عدد عشرة أضعاف الثابت الزمني ، حيث توضح المعادلة 4-21 (أ) أن $q = q_0 e^{-10}$ ؛ أي

$4.5 \times 10^{-5}\ q_0$. ولهذا عند اللحظة $t = 10\ \tau c$ فإن الشحنة والجهد ينخفضان إلى 4.5×10^{-5} مرة قدر قيمهما الأصلية ، ولهذا فإن V ستكون عندئذ 0.90 V وهى كمية آمنة تماماً .

21-2 كميات التيار المتردد ؛ قيم جذر متوسط المربعات (RMS)

تقوم شركات توزيع القدرة الكهربية ما يعرف باسم الجهود المترددة (a.c) وتولد الشركات هذه الجهود بواسطة المولدات ذات الملف الدوار ، حيث يكون الجهد v المتولد شبيهاً بالجهد المتردد المبين فى الشكل 18–20 . وسوف تتذكر أنه جهد جيبى يعطى بالمعادلة $v = v_0 \sin 2\pi ft$ ، حيث f هو تردد الدوران للف المولد (وهو يساوى 60 Hz فى الولايات المتحدة) . وعندما يطبق هذا النوع من الجهود على مقاوم فإنه ينتج تياراً كالمبين فى الشكل 2–21 ، أو تياراً جيبياً ومعادلته هى $i = i_0 \sin 2\pi ft$. وكما ترى فإننا قمنا بتغيير بعض الرموز التى استخدمت فى الفصول السابقة وفيما تبقى من هذا الكتاب فإننا سنستخدم حروفاً صغيرة مثل v و i للدلالة على الجهود والتيارات التى تتغير مع الزمن . وسوف نعرف على الفور أننا قد حجزنا الحروف الكبيرة أى V و I لكميات أخرى سترد عند مناقشة الجهود والتيارات المترددة .



شكل 2–21: تكون القيمة الفعالة أو جذر متوسط مربع التيار هى $I = i_0 / \sqrt{2} = 0.707 i_0$.

ومن المثير للاهتمام أن القيمة المتوسطة عبر دورة كاملة للجهد أو التيار المتردد لابد أن تكون صفراً . فكما يمكنك من دراسة الشكل 2–21 فإن الدالة الجيبية (وكذلك دالة جيب التمام) ذات قيم سالبة بقدر مالها من قيم موجبة تماماً . ومن ثم فإن قيمتها المتوسطة تكون صفراً . وعلى ذلك ، وبالنسبة لجهد أو تيار مترددين (ac) فإن :

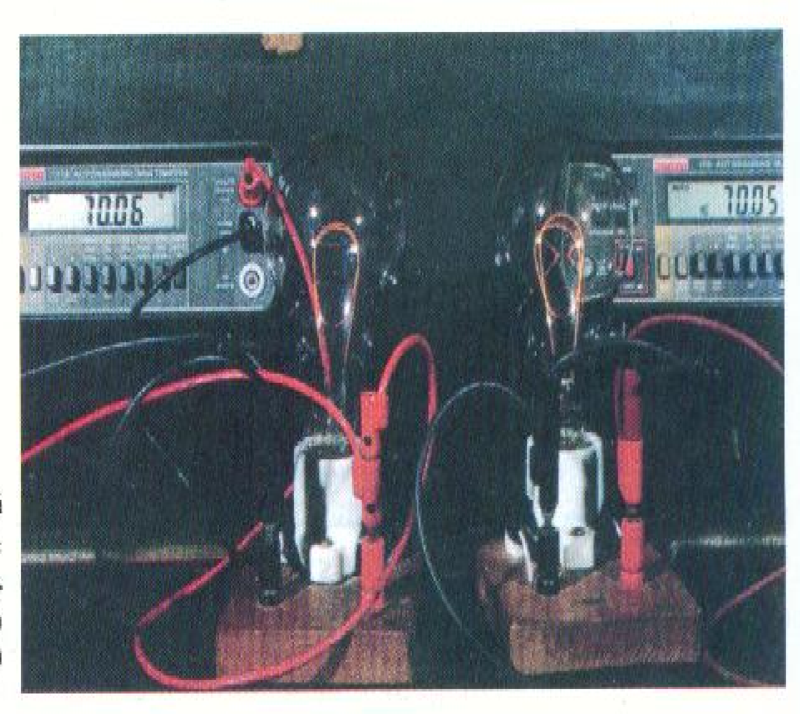
$$v_{av} = i_{av} = 0$$

ولهذا السبب لا يمكن استعمال التيارات المترددة فى شحن البطاريات أو فى التطبيقات المماثلة . فلو أن البطارية شحنت عندما يكون التيار موجباً فإنها ستمر بقدر مساوٍ من التفريغ عندما يكون التيار سالباً .

وقد أثير خلاف حاد فى أواخر القرن التاسع عشر حول أيهما أكثر جدوى من الناحية العملية ، الكهرباء المنقولة بالتيار المتردد أو المنقولة بالتيار المستمر . ويمكن استعمال كلا النوعين للإضاءة وتشغيل المحركات . وقد انتصر فى النهاية التيار المتردد

لأن جهده يمكن تحويله بسهولة إلى قيم أعلى أو أقل بواسطة المحـولات ، كما تعرفنا عليها فى الفصل السابق .

وتستخدم القدرة التى تصل إلى بيوتنا فى تشغيل المواقد الكهربائية أو مصابيح الإضاءة ، ومثل هذه الاستخدامات تنطوى على حرارة تتولد من التيـار المـار فـى مقـاوم . وبمـا أن القدرة المستهلكة فى هذه الحالات هى i^2R ، فإن الأمر سيان لو أن التيار كـان سـالبًا أم موجبًا لأن i^2 ستكون موجبة دائمًا . وعلى هذا فالتيـار المـتردد يستوى فـى جدواه مـع التيار المستمر بالنسبة لـهذه التطبيقات .



قراءة جهاز القيـاس إلـى اليميـن هـى 70 V rms ac . (تيار متردد) ، أمـا جهاز القياس إلى اليسار فيقرأ 70 V dc (تيار مستمر) . ولكل من الجهدين نفـس التأثير على بصيلات الإضاءة .

على إننا فى حاجة إلى طريقة خاصة نصف بـها التيـارات والجـهود فـى دوائـر التيـار المتردد نظرًا لأن i_{av} و v_{av} يكونان أصفارًا بالنسبة لحالة التيار المتردد .

سنفترض أن لدينا تيارًا $i = i_0 \sin 2\pi ft$ ينقل قدرة إلى المقاوم R . وهـذه القـدرة فـى أى لحظة هى

$$\text{القدرة} = i^2R = Ri_0^2 \sin^2 2\pi ft$$

وينصب اهتمامنا فى أغلب التطبيقات على متوسط القدرة :

$$\text{متوسط القدرة} = Ri_0^2 (\sin^2 2\pi ft)_{av}$$

ويمكن إثبات أن القيمة المتوسطة للمقدار $\sin^2\theta$ هو 0.50 . ولذلك*

$$\text{متوسط القدرة} = R\left(\frac{i_0}{\sqrt{2}}\right)^2$$

* تذكر أن $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ ، ولما كان الرسم البيانى لكل من $\sin\theta$ و $\cos\theta$ لهما نفس الشكل فإن $(\cos^2\theta)_{av} = (\sin^2\theta)_{av}$. ولهذا فإن $(\sin^2\theta)_{av} + (\cos^2\theta)_{av} = 1$ أو $2(\sin^2\theta)_{av} = 1$ ومنها $(\sin^2\theta) = 0.50$.

وبمقارنة هذه المعادلة بالتعبير الخاص عن قدرة التيار المستمر $P = I^2R$ يتضح لنا أن التيار المتردد الذى ينتج قدرة متوسطة مكافئة لها هو $(i_0 / \sqrt{2})$ أو $0.707\ i_0$. ونطلق على هذا المقدار **جذر متوسط مربع التيار** (rms أو التيار الفعال) أو جذر متوسط مربع الجهد بالرمز V ونعرفه بالعلاقة $V = v_0 / \sqrt{2} = 0.707\ v_0$. ونلخص فما يلى :

قيم (rms) لكل من التيار I والجهد V هى :

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{2}} \qquad \text{و} \qquad V = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

حيث i_0 و v_0 هى سعات كل من التيار والجهد اللذين يتغيران جيبيًا مع الزمن .

ويبين الشكل 2–21 قيمة I ، ومن ثم فإن الفقد فى القدرة فى المقاوم فى دائرة تيار متردد هى :

$$P = \frac{1}{2} i_0^2 R = I^2 R$$

وعلينا أن نلاحظ أنه فى دائرة تيار مستمر يكون التيار اللحظى أو المتوسط أو (r.m.s) هو نفسه .

21-3 دوائر المقاومة

نستطيع الآن دراسة دوائر التيار المتردد وذلك بأخذ ثلاثة عناصر للدائرة كل فى دوره فى الاعتبار ، على أن يكون متصلاً على التوالى مع مصدر للجهد المتردد وسنبدأ بدارسة دائرة بسيطة تحتوى على مقاومة ، كالمبينة فى الشكل 3–21 (أ) . ينطبق قانون أوم عند أية لحظة على المقاوم بحيث $v = iR$ ، وحيث أن $v = v_0 \sin 2\pi ft$ فإن :

$$i = \frac{v}{R} = \frac{v_0}{R} \sin 2\pi ft$$

أى أن كلاً من الجهد والتيار يتغيران مع الزمن بنفس الطريقة ، حيث يمران بالصفر ويصلان لأقصى قيمة وأدنى قيمة معًا فى نفس اللحظة . وتكون النسبة بين v و i هى نفسها ، أو R عند كل لحظة . ونستطيع أن نرى أن التيار والجهد فى دائرة مقاومة نقية يكونان **متوافقين فى الطور** .

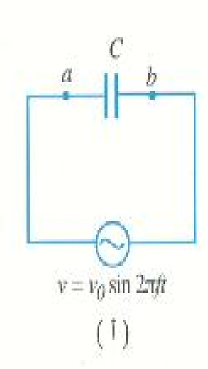
شكل 3–21:
يكون التيار المار فى مقاوم ما متحدًا فى الطور مع الجهد عبر المقاوم .

وفقد القدرة فى المقاوم هو I^2R كما أشرنا فى القسم السابق . وفى هذه الحالة الخاصة

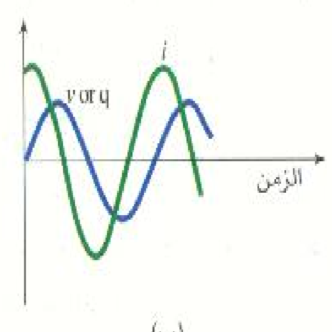
حيث لا يوجد بالدائرة سوى مقاومة فإن $I = V/R$ ومن ثم ففقد القدرة يمكن كتابته على الصورة IV حيث I و V هي قراءات r.m.s بجهاز القياس . وسوف ندرك في الأقسام التالية أنه لا يوجد فقد في متوسط القدرة في مكثف نقي أو ملف محاثة نقي .

يحدث كل فقد القدرة في دوائر التيار المتردد البسيطة في المقاومات .

21-4 دوائر السعة ؛ الرد السعوى (المفاعلة السعوية)



(أ)



(ب)

شكل 4-21:
يتأخر الجهد عبر المكثف عن التيار بحيث يصل إلى قيمته القصوى بعد وصول التيار لقيمته بنحو (1/4) دورة .

سندرس الآن حالة دائرة السعة المبينة في الشكل 4-21 (أ) . ولقد سبق أن درسنا في القسم 1-21 كيف يقوم التيار بتوصيل شحنة إلى مكثف ليخلق فرق جهد بين طرفيه . وبعبارة أخرى فإن التيار يعتبر نذيرًا ضروريًا للجهد ويسبقه . ويغير التيار من قطبيته باستمرار في حالة إشارة جهد جيبية فيجلب شحنة موجبة إلى أحد اللوحين أولاً ثم يجلبها إلى الآخر . ويقودنا هذا إلى أن نتوقع - ولو وصفيًا - أن التيار المتردد يقود باستمرار الجهد المتردد عبر المكثف ويسبقه ببعض الوقت .

ويمكننا أن نكون أكثر دقة من هذا . ففي الشكل 4-21 يُعطى فرق الجهد بين النقطتين (a) و (b) بمصدر الجهد :

$$v(t) = v_0 \sin 2\pi ft$$

ويكون هو نفسه الجهد عبر C وهو الذى يتحدد بالمقدار $q(t)/C$. وحيث أن C مقدار ثابت ، فإن الشحنة على المكثف لابد وأن تتذبذب مع جهد المصدر بحيث تتوافق معه في الطور :

$$q(t) = Cv_0 \sin 2\pi ft$$

وإذا أردنا أن نعرف كيف يتغير التيار في الدائرة مع الزمن ، فعلينا تذكر أن التيار يعرف دائمًا بأنه معدل سريان الشحنة ؛ معنى هذا أن معدل تغير الشحنة على المكثف في أية لحظة $\Delta q/\Delta t$ يساوى التيار المار في الدائرة في تلك اللحظة . إلا أن $\Delta q/\Delta t$ ليست سوى ميل المنحنى الذى يبين العلاقة بين q و t كما في الشكل 4-21 (ب) . وكل ما نحتاجه هو إيجاد ميل هذا المنحنى ثم رسم النتائج لنحصل على رسم بيانى لعلاقة التيار بالزمن .

يلاحظ أنه عند $t = 0$ ، يكون لمنحنى q أكبر ميل موجب . ثم يتناقص هذا الميل حتى يصل إلى الصفر عندما تصل q إلى قمتها ، حيث يكون $i = 0$. ويتحول ميل العلاقة بين q و t فيصبح سالبًا ، ثم يصل إلى أقصى قيمة سالبة له عندما تصل q إلى الصفر . وتقع هذه النقطة عند منتصف دورة الجهد (الفولطية) . ويظل الميل سالبًا وإن كان يقل تدريجيًا حتى يصل منحنى الشحنة إلى نهايته الصغرى . وعندئذ يعود التيار فيصبح صفرًا ، وعندما يبدأ منحنى الشحنة في الزيادة مرة أخرى فإن التيار يصبح موجبًا . وإذا ما اعتبرنا كل التفاصيل فإننا نستطيع أن نرسم المنحنى الدقيق للعلاقة بين التيار والزمن t ، وهو ما نراه في الشكل 4-21 (ب) .

ومن الواضح الآن أن كلاً من q و i يمران بتغيرات جيبية لها نفس التردد . ولكن التيار والشحنة **ليسا متوافقين فى الطور** كما وصفنا آنفاً .

وفى الواقع فإن i يصل إلى قيمه القصوى والصغرى متقدمًا بربع (1/4) دورة عن القيم المناظرة لكل من q (و v) . ويقودنا هذا إلى النتيجة المهمة التالية :

فى الدائرة المحتوية على مكثف فقط فإن التيار المتردد يقود الجهد المتردد بربع دورة .

والمنحنى المبين فى الشكل 4-21 (ب) هو منحنى دالة جيب تمام (.cos) ولهذا فإن التعبير الرياضى عن $v(t)$ و $i(t)$ هو :

$$v(t) = v_0 \sin 2\pi ft \qquad \text{و} \qquad i(t) = i_0 \cos 2\pi ft$$

سنقوم الآن ببحث موضوع تبدد القدرة فى هذا النوع من الدوائر . تعطى القدرة اللحظية الواصلة إلى المكثف بالعلاقة المعتادة الآتية :

$$\text{القدرة} = vi = v_0\, i_0 \sin 2\pi ft \cos 2\pi ft$$

ويمكن التعبير عن هذا بصورة أفضل إذا تذكرنا أن :

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

وبقسمة هذه المعادلة على 2 والتعويض بالمقدار $2\pi ft$ بدلاً من θ فإن :

$$\text{القدرة} = \frac{1}{2} v_0\, i_0 \sin 4\pi ft$$

ويعنى هذا أن القدرة اللحظية الواصلة إلى المكثف تتغير جيبيًا وترددها ضعف تردد الجهد المتردد . ومن ثم يكون متوسط القدرة الواصلة على المكثف صفرًا وذلك لأن الدالة الجيبية تكون سالبة بقدر ما تكون موجبة . وخلال نصف الدورة يتم شحن المكثف وتختزن بداخله الطاقة ، أما خلال نصف الدورة التالى فإن المكثف يفرغ شحنته ويعيد ما اختزنه من طاقة إلى مصدر القدرة وتكون النتيجة النهائية هى ما يلى :

فى دائرة تيار متردد ، يكون متوسط القدرة المستهلكة فى مكثف مثالى صفرًا .

ولكى يكتمل تحليلنا للكيفية التى يؤثر بها مكثف على التيار فى دائرة تيار متردد فإننا بحاجة إلى إيجاد علاقة بين i و v تماثل قانون أوم بالنسبة للمقاومات والسبيل إلى هذا هو معرفة تفاعل المكثف مع تردد الجهد المطبق عليه . فإذا كان التردد منخفضًا جدًا ، كأن يكون دورة واحدة فى الساعة ، فإن المكثف سيصبح مشحونًا تمامًا فى كسر صغير من دورة ، أما فى معظم ما تبقى من الدور فإن المكثف سيمنع أى شحنة من المرور من خلاله . أما عند الترددات المرتفعة فإن الجهد سيتردد بسرعة بحيث يقضى المكثف معظم الوقت بين حالتى الشحن والتفريغ مما يعنى أن التيار سيمر بشكل مستمر تقريبًا جيئة وذهابًا خلال الدائرة . ونستطيع من ثم القول :

إن قابلية المكثف على إعاقة التيار كبيرة جدًا عند الترددات المنخفضة وصغيرة عند الترددات المرتفعة .

ويمكننا أيضا أن ندرك أن قيمة C تلعب دورًا فى تحديد قيمة التيار . إذ أن C الكبيرة تتطلب شحنة أكبر حتى تكوّن جهدًا مقداره v_0 أو أن مزيدًا من الشحنة لابد أن يسرى نحو السعة الكبيرة . كما أن تيارًا صغيرًا نسبيًا سيكون لازما لشحن مكثف ذى سعة صغيرة تمامًا . ولذا يمكن القول .

إن مقدرة مكثف ما على إعاقة التيار كبيرةً إذا كانت C صغيرة و صغيرة إذا كانت C كبيرة .

ويشار إلى مقدرة المكثف على إعاقة سريان الشحنة بمصطلح **الرد السعوى (أو المفاعلة السعوية)** ويرمز له بالرمز Xc . وترتبط هذه الكمية بقيم (rms) للتيار والجهد فى الدائرة المبينة فى الشكل 4-21 بعلاقة تماثل قانون أوم :

$$V = IXc \qquad (21\text{-}5)$$

حيث تحل Xc محل R فى قانون أوم . ويمكن عند استعمال حساب التفاضل والتكامل إثبات أن :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \qquad (21\text{-}6)$$

ولابد أنه من الواضح من المعادلة (5-21) أن وحدات Xc هى الأوم . إلا أنه يتوجب عليك أن تصل إلى هذه النتيجة من تعريف وحدة الهيرتز (Hz) والفاراد (.F) ويلاحظ أن الأثر المعاوق للمكثف معبرًا عنه بالكمية Xc ، يعتمد على f و C على الصورة التى شرحناها وصفيًا فيما سبق .

ومن الأهمية بمكان إدراك الفرق التالى بين المعادلة (5-21) وقانون أوم :

يُعرّف الرد السعوى Xc بدلالة قيم (rms) فقط لكل من التيار والجهد ، ولا ينطبق على القيم اللحظية لهما .

والسبب فى هذا هو أنه عند أية لحظة يكون v و i فى نقط مختلفة من دوراتهما المختلفة .

مثال 1-21 :

اعتبر أن لديك فولتميتر متصل عبر مصدر الجهد المبين فى الشكل 4-21 وإنه يشير إلى 80 V وكان $C = 0.40\ \mu F$. أوجد قيمة (rms) للتيار إذا كان تردد الجهد هو (أ) 20 Hz و (ب) 2×10^6 Hz .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف ترتبط قيمة (rms) للتيار مع قيمة (rms) للجهد بالنسبة للدائرة المبينة فى الشكل 4-21 ؟

الإجابة : إن النسبة V/I هى الرد السعوى Xc :

$$\frac{V}{I} = X_C$$

سؤال : ما الذى يعين X_C ؟

الإجابة : إنه تردد الجهد وقيمة السعة C :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

الحل والمناقشة : سنحسب أولاً X_C بدلالة f :

$$X_C = \frac{1}{2\pi f(4.0 \times 10^{-7}\,\text{F})} = \frac{4.0 \times 10^5}{f}\ \Omega/\text{s}$$

إذن ،

بالنسبة للتردد $f = 20\ \text{Hz}$: $X_C = 2.0 \times 10^4\ \Omega$

وبالنسبة للتردد $f = 2 \times 10^6\ \text{Hz}$: $X_C = 0.20\ \Omega$

وعلى هذا تكون قيم rms للتيارين كما يلى :

بالنسبة للتردد $f = 20\ \text{Hz}$

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{80\ \text{V}}{2.0 \times 10^4\ \Omega} = 4.0\ \text{mA}$$

بالنسبة للتردد $f = 2\ \text{MHz}$

$$I = \frac{80\ \text{V}}{0.2\ \Omega} = 400\ \text{mA}$$

ويلاحظ الأثر الضخم للتردد فى تحديد قيمة rms للتيار .

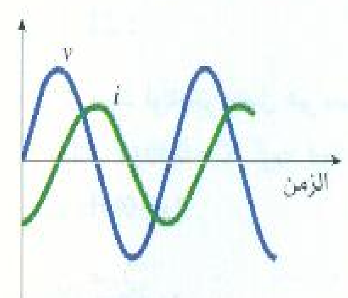
تمرين : ما هى سعات التيار والجهد فى هذا المثال ؟

الإجابة : $v_0 = 113\ \text{V}$ ، $i_0 = 5.7\ \text{mA}$ ، $i_0 = 570\ \text{A}$

5-21 دوائر المحاثة ؛ الرد الحثى (أو المفاعلة الحثية)



(أ)



(ب)

شكل 5-21:
يقود الجهد عبر ملف المحاثة التيار المار خلاله بتسعين درجة (°90) أو (1/4) دورة . وعليك ملاحظة الرمز المستخدم للدلالة على ملف المحاثة .

يمكننا تحليل سلوك دائرة المحاثة الذاتية البسيطة المبينة فى الشكل 5-21 (أ) بطريقة تماثل المستخدمة فى دائرة السعة . وسنبدأ باعتبار أن التيار المار فيها يتغير كدالة جيبية فى الزمن :

$$i(t) = i_0 \sin 2\pi ft$$

والرسم البيانى لهذا السلوك موضح فى الشكل 5-21 (ب) . ونريد الآن أن نعرف كيفية تغير الجهد عبر ملف المحاثة $v(t)$ مع $i(t)$. ونعرف من المعادلة (5-20) أن الجهد عبر ملف محاثة هو $L(\Delta i/\Delta t)$. ومن ثم ترتبط القيم اللحظية لكل من v و i بالعلاقة :

$$v(t) = L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

وعلى هذا نستطيع أن نعين $v(t)$ إذا رسمنا العلاقة البيانية بين ميل المنحنى $i(t)$ باستخدام

نفس اللاحظات التى أشرنا إليها فى القسم السابق والنتيجة مبينة فى الشكل 5-21 (ب) . ويتضح أنه فى هذه الحالة يقود الجهد التيار بربع (1/4) دورة .



تصنع ملفات المحاثة فى أحجام عديدة لكى تؤدى وظائف متنوعة فيما يتعلق بالعمل والصناعة .

فى الدائرة المحتوية على ملف محاثة فقط فإن الجهد المتردد يقود التيار المتردد بربع (1/4) دورة .

وتتفق هذه النتيجة مع ملاحظاتنا الوصفية التى أشرنا إليها فى بداية هذا الفصل وهى أن التيار « يطارد » دائمًا الجهد المطبق على ملف المحاثة .

ونستطيع استخدام نفس الاستدلال المنطقى المتبع فى القسم 4-21 لكى نثبت أن ملف المحاثة لا يستهلك ـ فى المتوسط ـ أية طاقة . فعلى الرغم من أن المصدر يختزن الطاقة فى ملف المحاثة خلال جزء من الدورة ، فإن ملف المحاثة يقوم بإعادتها إلى المصدر فى جزء يليه من الدورة . وقد بينًا فى الفصل العشرين أن الطاقة المختزنة فى ملف المحاثة هى $(\frac{1}{2}Li^2)$. وتحسن صنعًا إذا فحصت الشكل 5-21 (ب) وحددت جزء الدورة الذى يفقد المصدر أثناءه طاقة والجزء الذى تتم فيه إعادة تلك الطاقة إلى المصدر .

فى دائرة تيار متردد ، فإن متوسط القدرة المستهلكة بواسطة ملف محاثة نقى يكون صفرًا .

ونبحث ـ كما سبق ـ عن علاقة بين الجهد والتيار فى دائرة محاثة . إن ق.د.ك المستحثة والتى تعوق نمو التيار هى $L(\Delta i/\Delta t)$ ، وكلما زادت قيمة L كلما زاد هذا التأثير ولذا يمكننا القول بأن :

مقدرة ملف محاثة ما على إعاقة التيار فى دائرة تيار متردد ، تتناسب مع المحاثة .

ويتناسب المعامل $\Delta i/\Delta t$ ببساطة مع التردد الذى يتغير به اتجاه التيار . ونستنتج من ثم أن :

مقدرة ملف محاثة ما على إعاقة التيار فى دائرة تيار متردد يتناسب مع التردد .

ونمثل الأثر المعوق لملف المحاثة عادة **بالرد الحثى (أو بالمفاعلة الحثية)** X_L حيث يعرف X_L بثابت التناسب بين قيمة rms للفولطية (الجهد) وقيمة rms للتيار فى الدائرة :

$$V = I X_L \qquad (21\text{-}7)$$

ويمكن إثبات أن :

$$X_L = 2\pi f L \qquad (21\text{-}8)$$

وهى نتيجة تتفق مع مناقشتنا الوصفية السابقة ، كما أن المعادلة (7-21) هى المكافئ لقانون أوم فى حالة ملفات المحاثة . ولابد أن تكون وحدات X_C هى الأوم ، وهى حقيقة عليك إثباتها من تعريفى الهيرتز (Hz) والهنرى (H) .

وكما حدث فى حالة الرد السعوى فإن X_L تربط بين قيم rms لكل من I و V . كما أنها لا تنطبق على القيم اللحظية .

ونور في جدول (1-21) ملخصًا لأنواع التأثيرات لعناصر دوائر التيار المتردد .

الجدول 1-21 : تأثيرات كل من L , R , C في دوائر التيار المتردد .

	المقاوم	الكثف	ملف المحاثة
علاقات الطور بين v و i	متفقة في الطور	i يقود v بربع دورة	v يقود i بربع دورة
العلاقة بين V و I	$V = IR$ R لا تعتمد على f	$V = IX_C$ $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$	$V = IX_L$ $X_L = 2\pi fL$
متوسط فقد القدرة	$P = I^2R$	$P = 0$	$P = 0$

مثال 2-21 :

افترض أن ملف المحاثة المبين في الشكل 5-21 (أ) قيمته 15 mH . وكان جهد المصدر كما يبينه جهاز قياس التيار المتردد هو 40 V وتردده 60 Hz . أوجد التيار المار في ملف المحاثة . وكرر الحسابات عندما يكون التردد 6.0×10^5 Hz .

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي الكمية التي تربط بين قيمة (rms) للتيار وقيمة (rms) للجهد في ملف محاثة ؟

الإجابة : إنها الرد الحثي X_L : $V = I X_L$ ، حيث $X_L = 2\pi fL$

الحل والمناقشة : بالنسبة للمصدر الذي تردده 60 Hz فإن الرد هو

$$X_L = 2\pi(60 \text{ Hz})(15 \times 10^{-3} \text{ H}) = 5.6\ \Omega$$

وبالنسبة للتردد 0.60 MHz :

$$X_L = 2\pi(0.60 \times 10^6 \text{ Hz})(15 \times 10^{-3} \text{ H}) = 5.7 \times 10^4\ \Omega$$

وقيمة rms للتيار المناظرة

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{40 \text{ V}}{5.6\ \Omega} = 7.1 \text{ A}$$

و

$$I = \frac{40 \text{ V}}{5.7 \times 10^4\ \Omega} = 7.1 \times 10^{-4} \text{ A}$$

لاحظ كيف يعوق ملف المحاثة التيار بشكل كبير عند الترددات المرتفعة .

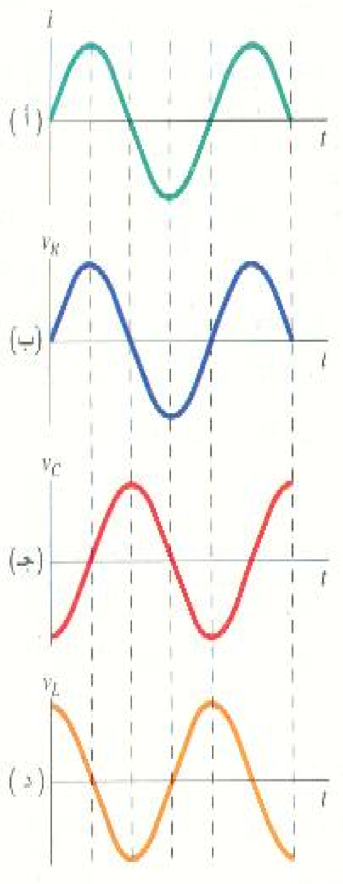
شكل 6-21:
دائرة LRC على التوالي .

6-21 دوائر LRC مجتمعة ؛ علاقة الطور بين التيار والجهد

سندرس الآن حالة دائرة تتصل فيها العناصر الثلاثة معًا على التوالي ، وهي الدائرة التي

تعرف بدائرة LRC على التوالى ويبين إحداها الشكل 6-21 ونود الآن تحديد العلاقة ـ كما سبق ـ بين قيم rms للتيار وقيم rms للجهد . كما نود أن نحدد علاقة الطور بين القيم اللحظية v و i وفقد القدرة في الدائرة .

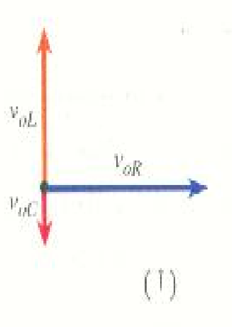
وفى البداية ، نؤكد أن كل عنصر فى الدائرة لابد أن يمر به نفس التيار اللحظى . وسنعتبر هذا التيار على صورة ، $i(t) = i_0 \sin 2\pi ft$. والشكل 7-21 (أ) يمثل هذا التيار بيانيًا . ونستطيع على الفور أن نرسم بيانيًا الجهد عبر كل من عناصر الدائرة بناء على مناقشتنا السابقة . والجهد عبر R وهو v_R يتفق فى الطور مع i (الشكل 7-21 (ب)) ؛ أما الجهد عبر C وهو v_C **فيتأخر** عن التيار بربع دورة (الشكل 7-21 (جـ)) ، أما الجهد عبر L ، v_L فيقود التيار ، أى يسبقه بربع دورة (الشكل 7-21 (د)) .



شكل 7-21:
v_R فقط هو المتفق فى الطور مع i . أما V_L و V_C فتختلف فى الطور بمقدار (1/4) دورة (°90) مع i .

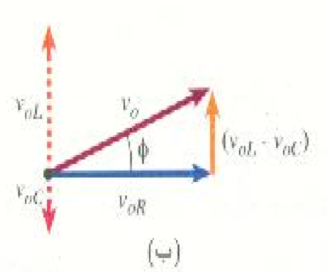
يلاحظ من هذه الرسومات البيانية أن V_L و V_C لهما دائمًا إشارة معاكسة ، ولهذا فهما يطرحان من بعضهما . افترض أن فولتميتر تيار متردد يسجل V_L عبر ملف المحاثة و V_C عبر المكثف . فإذا كان $V_L = V_C$. فإن سعتى v_C و v_L ستكونان متساويتين تمامًا ، ويلغى v_C تمامًا v_L وفى هذه الحالة فإن الفولتميتر المتصل بين النقطتين b و d فى الشكل 6-21 سوف يسجل صفرًا وليس $V_C + V_L$! وهكذا نرى أن قراءات فولتميتر التيار المتردد لا تجمع لكى تعطى فروق الجهد الصحيحة . وعلى الرغم من أن الجهود اللحظية تجمع مباشرة ، إلا أن قيم rms للجهود والتى تسجلها أجهزة قياس التيار المتردد تكون دائمًا موجبة ولا تظهر آثار الإلغاء التى قد تكون موجودة .

ويمكن جمع المقادير المتذبذبة التى تكون مختلفة فى الطور مع بعضها البعض بواسطة رسم هندسى بيانى بسيط . ومفتاح فهم هذا الرسم هو فى معرفة أن 1/4 دورة تكافئ اختلافًا مقداره °90 فى طور كمية تتغير جيبيًا مع الزمن . وسنمثل سعة الجهد عبر R وهى v_{0R} بمتجه يتجه نحو اليمين فى الشكل 8-21 (أ) . **ونعلم أن هذا الجهد متفق فى الطور مع التيار المار فى الدائرة ولذلك فإن هذا الاتجاه هو الذى يمثل التيار أيضًا** . ولكى نمثل سعة الجهد v_{0L} عبر L فلابد من رسم متجه يتجه بزاوية °90 بعيدًا عن v_{0R} كما الشكل 8-21 (أ) . وهذه الزاوية هى التى تناظر اختلافًا فى الطور مقداره ربع دورة بين v_{0L} و i_0 . أما سعة الجهد v_{0C} عبر المكثف فلابد من رسمها فى اتجاه **ضد** اتجاه v_{0L} . وتتحدد **مقادير** هذه المتجهات من قانون أوم والقوانين المكافئة له .



$$v_{0R} = i_0 R \quad , \quad v_{0L} = i_0 X_L \quad , \quad v_{0C} = i_0 X_C$$

ويمكننا الحصول على السعة الخاصة بالجهد الكلى v_0 المطبق على الدائرة باللجوء إلى جمع المتجهات المعتاد . فنبدأ أولاً بطرح v_{0L} و v_{0C} المتعارضين كما فى الشكل 8-21 (ب) . ثم نضيف هذا المتجه الناتج إلى v_{0R} باستخدام نظرية فيثاغورس .



شكل 8-21:
تجمع قيم rms للجهود فى دائرة RLC جمعًا متجهيًا (جمع متجهات) .

$$v_0^2 = v_{0R}^2 + (v_{0L} - v_{0C})^2 = i_0^2 [R^2 + (X_L - X_C)^2]$$

وبأخذ الجذر التربيعى لهذا المقدار فإننا نحصل على القانون المكافئ لقانون أوم بالنسبة لدائرة LRC :

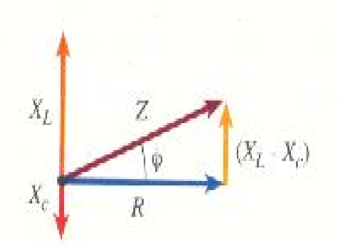
$$v_0 = i_0 Z \tag{21-9}$$

حيث يطلق على Z اسم **معاوقة** الدائرة وتعطى بالمعادلة

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{21-10}$$

ووحدات Z هى الأوم كما يمكنك استنتاج ذلك بسهولة . ويوضح الشكل 9-21 العلاقة التربيعية بين R ، $(X_L - X_C)$ و Z بما يتفق مع المعادلة (10-21) .

ومن الطبيعى أن تنطبق المعادلة 9-21 أيضًا على قيم rms لكل من I و V لأنهما ببساطة حاصل ضرب المعامل الثابت 0.707 فى السعات المناظرة . ويلاحظ أن الأمر سيان ، سواء طرحنا X_L من X_C أو العكس ، لأننا فى كلتا الحالتين سوف نربع الفرق عند حساب Z .



شكل 9-21:
تمثل المعاوقة بوتر المثلث قائم الزاوية الذى ضلعاه هما R و $|X_L - X_C|$. والزاوية ϕ هى زاوية الطور بين i_0 (فى اتجاه محور R) و v_0 (فى اتجاه المحور Z) .

والزاوية ϕ فى الشكل 9-21 هى الفرق فى الطور بين i و v فى الدائرة . ولكى ندرك هذا ، فإن عليك ملاحظة أنها الزاوية المحصورة بين الجهد الكلى والجهد عبر R الذى يتفق فى الطور مع i . ونستطيع بسهولة أن نحصل على ϕ من :

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} \tag{21-11}$$

إذا كان $X_L > X_C$ فإن الجهد **يتقدم** على التيار (**يقوده**) بزاوية طور مقدارها ϕ . أما إذا كان $X_L < X_C$ فإن الجهد **يتخلف** (يتأخر) عن التيار بالزاوية ϕ .

وعلى الرغم من معرفتنا أن فقد القدرة فى الدائرة يحدث كلية فى R ويساوى I^2R إلا أن هناك طريقة مفيدة لحساب الفقد فى القدرة :

$$\text{الفقد فى القدرة} = I^2 R = \frac{V}{Z} I R = VI\left(\frac{R}{Z}\right) = VI\cos\phi \tag{21-21}$$

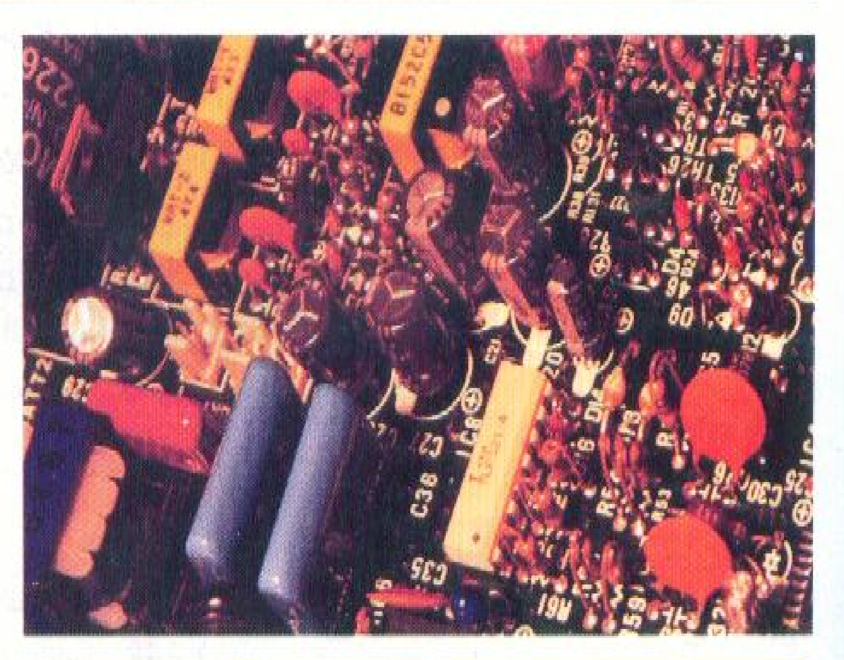
حيث استخدمت المعادلة (11-21) و V و I هى قيم rms لها كالمعتاد . ويسمى المعامل $\cos\phi$ **بمعامل القدرة** للدائرة .

ولدينا حالتان مثيرتان للاهتمام . إذا كانت الدائرة تحتوى على R و C فقط (أى أنها دائرة RC) ، فيمكننا عندئذ وضع $L = 0$ و $X_L = 0$. ومن ثم تؤول معاوقة الدائرة إلى :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \qquad (\text{دائرة } RC)$$

أما إذا لم تحتو الدائرة على مكثف ، فما هى قيمة X_C التى علينا استعمالها ؟ إذ ليس صحيحًا أن نقول أن $C = 0$ فى هذه الحالة لأن هذا يعنى أن X_C ستكون لانهائية . إن عدم وجود مكثف مكافئ للحالة $C = \infty$ ، حيث أن مثل هذا المكثف لن « يشبع » من الشحنات ولن يكون عائقًا أمام التيار بالتالى . وهكذا فإن $X_C = 0$ سيكون هو الاختيار الصحيح فى حالة دائرة RL . وسوف تكون المعاوقة هى

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \qquad (\text{دائرة } RL)$$



تحتوى لوحة دائرة إلكترونية على العديد من المقاومات والمكثفات وملفات المحاثة .

مثال 3-21 :

يتصل مصدر قدره ($V = 80.0$ V, $f = 2000$ Hz) على التوالى مع مقاوم 300 Ω ومكثف سعته 0.600 μF . أوجد (أ) التيار المار فى الدائرة ، (ب) قراءة الفولتميتر المتصل عبر المقاوم ، (جـ) قراءة الفولتميتر عبر المكثف و (د) الفقد فى القدرة فى الدائرة .

استدلال منطقى الجزء (أ) :

سؤال : ما هى العلاقة بين V و I فى دائرة RC المتصلة على التوالى ؟

الإجابة : $V = IZ$ ، حيث $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$.

سؤال : ما هى معادلة Xc ؟

الإجابة : من المعادلة (6-21) : $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ؛ حيث $f = 2000$ Hz

و $C = 0.60 \times 10^{-6}$ F .

الحل والمناقشة : سنوجد Xc و Z و I :

$$X_C = \frac{1}{2\pi(2000\ \text{Hz})(0.600 \times 10^{-6}\ \text{F})} = 133\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{(300\ \Omega)^2 + (133\ \Omega)^2} = 328\Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{80.0}{328\ \Omega} = 0.244\ \text{A}$$

استدلال منطقى الجزء (ب) :

سؤال : ما هو الجهد الذى سيسجله الفولتميتر ؟

الإجابة : إنه قيمة rms للجهد .

سؤال : ما الذى يحدد جهد (rms) عبر R و C ؟

الإجابة : $V_R = IR$ و $V_C = IX_C$

الحل والمناقشة : باستخدام قيم I و X_C التى أوجدناها من قبل ، فإن

$$V_R = (0.244\ \text{A})\ (300\ \Omega) = 73.2\ \text{V}$$

$$V_C = (0.244\ \text{A})\ (133\ \Omega) = 32.6\ \text{V}$$

ويلاحظ أن $V_R + V_C$ لا يساوى جهد المصدر وهو 80.0 V وذلك لأن الجهدين مختلفان فى الطور . إن قيمتيهما اللحظيتين ستظلان دائمًا مساويتين 80.0 V ولكن ليس هذا هو ما يسجله الفولتميتر .

استدلال منطقى الجزء (جـ) :

سؤال : على أى شىء يعتمد متوسط الفقد فى القدرة ؟

الإجابة : على قيمة (rms) للتيار وعلى المقاومة : $P = I^2R$.

الحل والمناقشة : متوسط الفقد فى القدرة هو

$$P = (0.244\ \text{A})^2\ (300\ \Omega) = 17.9\ \text{W}$$

وهناك طريقة بديلة بحساب معامل القدرة أولاً :

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{300\ \Omega}{328\ \Omega} = 0.915$$

والتعبير البديل للفقد فى القدرة هو

$$P = IV\cos\phi = (0.244\ \text{A})(80.0\ \text{V})(0.915) = 17.9\ \text{W}$$

مثال 4-21 :

افترض أن مصدر الجهد فى الشكل 6-21 يوفر (rms) للجهد مقداره 50.0 V بتردد مقداره 600 Hz . ثم افترض أن $R = 20.0\ \Omega$ ، $C = 10.0\ \mu F$ و $L = 4.00\ \text{mH}$. أوجد (أ) التيار المار فى الدائرة و (ب) قراءة الفولتميتر عبر R ، C ، L كل على حدة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة التيار ؟

الإجابة : $I = \dfrac{V}{Z}$

سؤال : ما هى قيمة Z فى هذه الدائرة ؟

الإجابة : بالنسبة لدائرة LRC فإن :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

حيث $X_C = \dfrac{1}{2\pi fC}$ و $X_L = 2\pi fL$

سؤال : ما هي معادلات قيم (rms) للجهود المنفردة ؟

الإجابة : $V_R = IR$ ، $V_C = IX_C$ ، $V_L = IX_L$

الحل والمناقشة : قيم الردود هي :

$$X_C = \frac{1}{2\pi(600\ \text{Hz})(10^{-5}\ \text{F})} = 26.5\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi(600\ \text{Hz})(4.0\times10^{-3}\ \text{H}) = 15.1\ \Omega$$

والفرق بين هذين المقدارين هو : $X_C - X_L = 11.4\ \Omega$

ومن ثم تكون المعاوقة هي :

$$Z = \sqrt{(20\ \Omega)^2 + (11.4\ \Omega)^2} = 23\ \Omega$$

ومنها نستنتج قيمة التيار :

$$I = \frac{50\ \text{V}}{23.0\ \Omega} = 2.17\ \text{A}$$

وفروق الجهد المنفردة (عبر كل عنصر على حدة) هي :

$$V_R = (2.17\ \text{A})(20\ \Omega) = 43.4\ \text{V}$$

$$V_C = (2.17\ \text{A})(26.5\ \Omega) = 57.5\ \text{V}$$

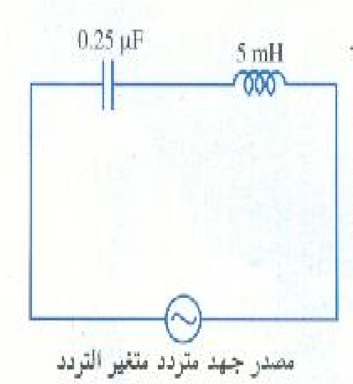
$$V_L = (2.17\ \text{A})(15.1\ \Omega) = 32.8\ \text{V}$$

يلاحظ أن فرق الجهد عبر المكثف أكبر من الذى يوفره المصدر . ومرة أخرى نؤكد أن قيم rms لفروق الجهد لا تجمع مثلما يحدث بالنسبة للقيم اللحظية . على إنها تجمع متجهيًا عندما يؤخذ الفرق فى الطور بينها فى الاعتبار .

تمرين : ما هو فرق الطور بين i و v ؟ أيهما يتقدم الآخر ؟

الإجابة : $\phi = 29.6°$ ، وبما أن $X_C > X_L$ فإن i تسبق (تقود) v بمقدار هذه الزاوية .

21-7 الرنين الكهربائى فى دوائر LRC المتصلة على التوالى



شكل 10-21: عند تغير تردد الجهد فإن كلاً من X_L و X_C تتغير كما بالشكل 11-21 أما التيار فيتغير كما فى الشكل 12-21 .

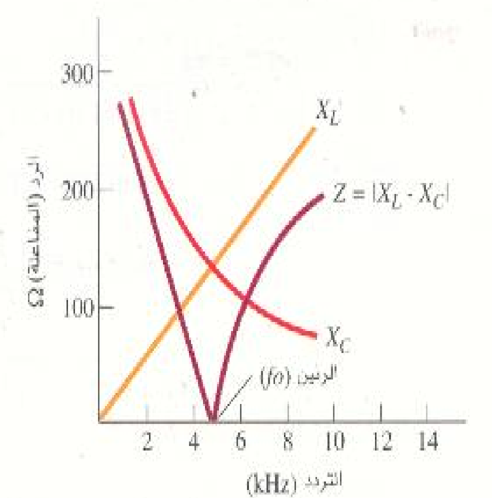
سننظر الآن فى حالة دائرة لا تحتوى إلا على مكثف C ومحاثة L ، كالمبينة فى الشكل 10-21 . على أن هذا ليس موقفًا واقعيًا ، لأن أى ملف محاثة لابد وأن يتضمن ـ بشكل عام ـ بعض المقاومة . وعلى الرغم من هذا فمثل هذه الدائرة المثالية يمكن أن نتعلم منها الكثير . إذا وضعت $R = 0$ فإن المعادلة 10-21 الخاصة بالمعاوقة تؤول على :

$$Z = |X_L - X_C|$$

وقد استعملنا هنا الخطين الرأسيين الدالين على القيمة المطلقة ، لأن المعاوقة السالبة ليس لها مدلول فيزيائى . والتيار المار فى هذه الدائرة هو :

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{|X_L - X_C|}$$

يلاحظ أنه عندما تكون $X_L = X_C$ فإن التيار يصبح لا نهائيًا .



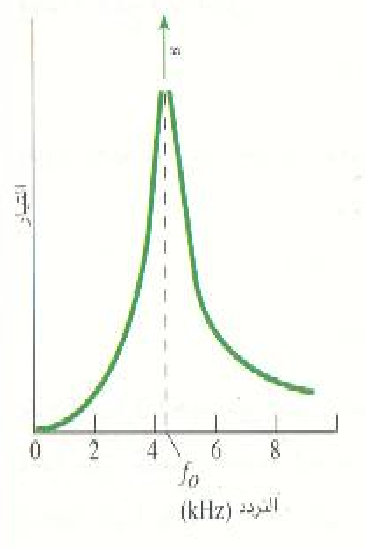
شكل 11-21:
تتغير كل من X_C ، X_L وكذا Z للدائرة المبينة فى الشكل 10-21 مع تردد المصدر .

ومن السهل - فى الواقع - الحصول على الشرط $X_L - X_C = 0$ لأن X_L تزيد بتزايد التردد بينما X_C تتناقص مع زيادة التردد . ويبين الشكل 11-21 كيفية تغير هذه المقادير بالنسبة لكل من C و L الواردتين فى الشكل 10-21 . وعندما يصبح التردد $f = 4500$ Hz فإن المعاوقة تصير صفرًا فى هذه الحالة . ويطلق على التردد الذى تصير عنده $X_L = X_C$ اسم **تردد الرنين** للدائرة ، وسنرمز له بالرمز f_0 . وبما أن $X_L = 2\pi fL$ و $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ فإن الرنين يحدث عندما

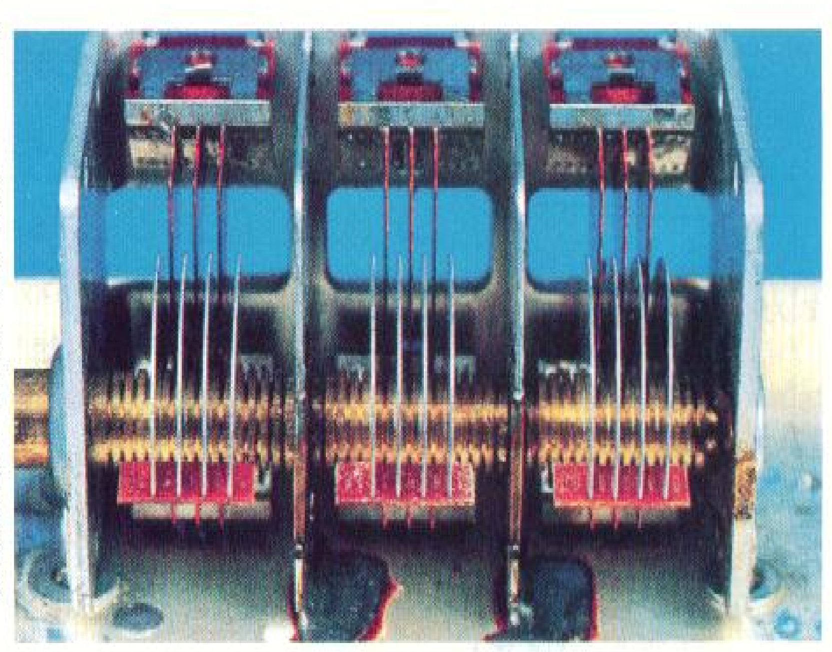
$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

ومنها نستنتج قيمة تردد الرنين :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad (21\text{-}13)$$



شكل 12-21:
عندما يتغير تردد المصدر المبين فى الشكل 10-21 ، فإن التيار المار فى الدائرة يسلك كما هو مبين بالشكل .



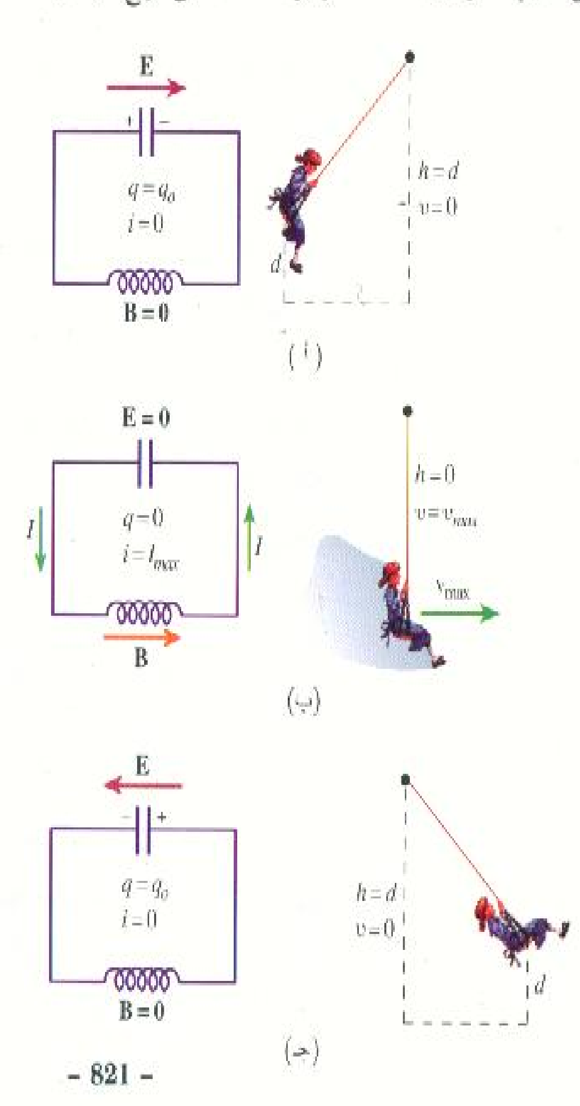
توضح الصورة مكثفًا متغيرًا من النوع المستخدم فى دائرة الهوائى لجهاز راديو . ويثبت مفتاح التناغم (الضبط) عند نهاية عمود من النحاس الأصفر . وعند إدارة هذا المفتاح فإن الألواح المعدنية ذات الحواف الفضية تتحرك إلى داخل أو خارج الحيز بين الألواح الثابتة ذات اللون الأحمر ؛ مما ينتج عنه تغير المساحة الفعالة للمكثف ومن ثم تغير سعته . مما يغير بدوره من تردد الرنين لدائرة LRC للهوائى مما يسمح للراديو أن يلتقط المحطات ذات الترددات المختلفة .

ويوضح الشكل 12-21 كيف يتغير التيار فى الدائرة المبينة فى الشكل 10-21 مع تغير تردد الجهد المتردد . (من الطبيعى أنه لابد لسعة الجهد أن تحفظ ثابتة عند كل الترددات) . وكما نلاحظ فإن التيار يصل إلى قمة حادة عند تردد الرنين . على أنه فى الدوائر العملية تكون القمة محددة وليست لانهائية وذلك لأن جميع الأسلاك لابد وأن تحتوى على بعض المقاومة .

دعنا الآن نطبق هذه النتيجة على دائرة LRC ، تعطى معاوقتها بالمعادلة 10-21 عند الرنين يلغى X_C و X_L أحدهما الآخر بحيث تظل $Z = R$. ويعنى هذا أيضًا أن $\cos \phi = 1$ وأن يكون الفقد فى القدرة $= IV$. وعليه نرى أن :

عند تردد الرنين تسلك دائرة LRC كما لو كانت دائرة بها مقاومة نقية فحسب .

ونستطيع فهم الرنين الكهربائى بشكل أفضل إذا أدركنا أنه يشبه إلى حد بعيد الرنين الميكانيكى . وتعلم بالفعل أن النظم الميكانيكية لها دائمًا تردد طبيعى تهتز عنده . وإذا دفع النظام بهذا التردد فإنه يهتز بأقصى سعة ممكنة ؛ وبعبارة أخرى فإن النظام يصل إلى حالة الرنين . ولدائرة LC البسيطة تردد طبيعى تهتز عنده أيضًا . وسنقوم الآن باستكشاف أوجه الشبه بين الرنين فى النظامين الكهربائى والميكانيكى . قارن بين دائرة LC والطفل الجالس على الأرجوحة فى الشكل 13-21 . افترض إنه عند لحظة البداية كان التيار فى الدائرة صفرًا بينما كانت الأرجوحة عند أعلى موقع لها . إذا كانت الشحنة



شكل 13-21:
مثلما تتذبذب طاقة الأرجوحة بشكل دائم بين طاقتى الوضع والحركة فإن طاقة الدائرة تختزن بالتبادل فى المكثف و ملف المحاثة .

علـى المكثف هـى q_0 فـإن الطاقة المختزنة بالمكثف ستكون $\frac{1}{2}(q_0^2/C)$. وبالمثل فإنه سيكون للأرجوحة طاقة وضع تثاقلية بسبب الجاذبية .

ونعلم أن المكثف سيبدأ فى التفريغ فى حالة النظام الكهربائى خلال ملف المحاثة . وسينمو التيار ببطء ملحوظ لأن ملف المحاثة يعارض أى تغير فى التيـار . وبـالمثل تبـدأ الأرجوحة فى اكتساب السرعة كلما تغلبت قـوى التسارع المؤثرة عليـها علـى قصورها الذاتى . أى أن كلاً من الأرجوحة والمكثف تفقد طاقة الوضع الخاصة بها . وعندما تصل الأرجوحة إلى قاع مسارها ، فإن كل ما لديها من طاقة وضع يتحـول إلى طاقـة حركـة . وإذا نقلنا التشابه إلى الدائرة فإنه عندما يفقد المكثـف كـل شحنتـه فـإن التيـار المـار فـى الدائرة يكون قد وصل إلى أقصى قيمـة وتصبـح الطاقـة الأصليـة مختزنـة الآن فـى ملـف المحاثة ومقدارها $(Li^2/2)$. ويمثل الشكل 13-21 ب هذا الموقف .

ومن الطبيعى ألا تتوقف الأرجوحة عند القاع ، إذا يظل قصورها الذاتـى يدفعـها إلى الحركة إلى أن تسكن تمامًا فى الموضع المبين فى الشكل 13-21 (جـ) لقد أصبحـت كـل طاقتها الآن وضعية مرة أخرى . ويحـدث الشىء نفسه تمامًا فـى الدائـرة الكهربيـة . فالمحاثة ـ بما لديها من قصور ذاتى من نوع خاص ـ ستعارض أى تغير فى التيار ولـهذا لا يتوقف التيار دفعة واحدة . ومع مرور الوقت يتوقف التيـار فـى النهايـة ويتـم شحـن المكثف تمامًا من جديد كما فى الجزء (جـ) وتتكرر هذه العمليات مرارًا وتكرارًا .

إن الدائـرة الكهربيـة تمـر بعمليـات تبـادل للطاقـة مثلمـا يحـدث فـى حـال الطفـل والأرجوحة . فتـتراوح طاقـة الأرجوحـة بـين وضعيـه وحركيـة أمـا الطاقـة فـى الدائـرة الكهربية فهى تارة تختزن فى المكثف وأخرى فى ملف المحاثة . ويظـل كـلا النظـامين يتذبذبان إلى الأبد جيئة وذهابًا مالم يكن هنـاك فقـد للطاقـة . ففـى حالـة الأرجوحـة ، يتسبب الفقد نتيجة الاحتكاك فى تخميد الذبذبات فى نهاية الأمـر فتـأخذ سعة الذبذبـات فى الاضمحلال ببطء .

بل يمكننا أيضا تتبـع المزيـد مـن التمـاثل بـين النظـامين . إن لكـل مـن الأرجوحـة والدائرة ترددات رنين طبيعية تميز حركتها . إن نظـام الأرجوحـة يمثـل بنـدولاً ، وقـد حسبنا التردد الطبيعى لذبذباته فى القسـم 6-14 . وتـردد الرنـين الطبيعـى للدائـرة هـو التردد الرنينى الذى حسبناه بالمعادلة 13-21 .

فإذا رغبنا فى جعل الطفل يتأرجح عاليًا جدًا ، فإن علينا دفعه وهو على الأرجوحة فى الوقت المناسب تمامًا وبتردد يساوى تردد الرنين الخاص بالأرجوحة . كمـا أننـا قـد وجدنا أن تيارًا كبيرًا جدًا ينمو فى الدائرة LC إذا قام المذبـذب « بدفـع » الدائـرة عنـد ترددها الرنينى . ومن ثم فإنه حتى سلوك الرنين فى النظـامين متشابـه إلى حـد بعيـد . وسيتضح عند دراسة الفصل التالى أن دائرة LC الرنينية تمثل جزءًا مهما فـى أى جـهاز استقبال إذاعى أو تليفزيونى .

مثال 21-5 :

لديك دائرة LRC متصلة على التوالي حيث $R = 10.0\ \Omega$ و $L = 50.0\ mH$ و $C = 5.00\ pF$. وكان هناك جهد قيمته 20.0 V rms مطبق على الدائرة عند ترددات مختلفة . (أ) ما هو تردد رنين الدائرة ؟ (ب) ما هي قيمة rms للتيار عند تردد الرنين ؟ (جـ) احسب معاوقة الدائرة والتيار المار بها عند تردد مقداره يزيد 1% عن تردد الرنين .

استدلال منطقى الجزءان (أ) و (ب) :

سؤال : ما هو شرط حدوث تردد الرنين ؟

الإجابة : يحدث الرنين عند تردد يتحقق معه الشرط $X_C = X_L$.

سؤال : ما هي معادلة f_0 ؟

الإجابة : $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

سؤال : ما هي العلاقة بين V و I عند الرنين ؟

الإجابة : عند الرنين $Z = R$ ولهذا يكون $I = V/R$.

الحل والمناقشة : تردد الرنين هو

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(50.0\times10^{-3}\ \text{H})(50.00\times10^{-12}\ \text{F})}} = 3.18\times10^5\ \text{Hz}$$

أما قيمة (rms) للتيار عند هذا التردد فهي

$$I = \frac{20.0\ \text{V}}{10.0\ \Omega} = 2.00\ \text{A}$$

استدلال منطقى الجزء (جـ) :

سؤال : ما هو التردد الذى يزيد 1% فوق تردد الرنين f_0 ؟

الإجابة : $f = 1.01 f_0$ أو $f = 1.01\,(3.18\times10^5\ \text{Hz})$.

$= 3.21\times10^5\ \text{Hz}$

سؤال : ما هي قيم X_C و X_L عند هذا التردد ؟

الإجابة :

$$X_C = \frac{1}{2\pi(3.21\times10^5\ \text{Hz})(5.00\times10^{-12}\ \text{F})} = 9.9\times10^4\ \Omega$$

$$X_L = 2\pi\,(3.21\times10^5\ \text{Hz})\,(50.0\times10^{-3}\ \text{H}) = 1.01\times10^5\ \Omega$$

سؤال : ما الفرق بين هذين الردين ؟

الإجابة : $X_L - X_C = 2000\ \Omega$

سؤال : ما هي المعاوقة عند التردد $1.01 f_0$ ؟

الإجابة : $Z = \sqrt{(10\ \Omega)^2 + (2000\ \Omega)^2} = 2000\ \Omega$

الحل والمناقشة : يلاحظ أن كلاً من X_L و X_C كبيرة جدًا بالمقارنة بالمقاومة R ، حتى عند الرنين . وما لم يكن أحدهما يلغى الآخر تمامًا (عند الرنين) فإنهما يشكلان إعاقة للتيار أكبر بكثير مما تشكله المقاومة بمفردها فالتيار عند التردد $f = 1.01\ f_0$ هو فقط ،

$$I = \frac{20\ \text{V}}{2000\ \Omega} = 0.01\ \text{A}$$

وهو ما يشكل 0.5 فى المائة فقط من تيار الرنين . وبذلك يكون استهلاك القدرة الذى يعتمد على I^2 هو $(0.005)^2 = 2.5 \times 10^{-5}$ من قيمة الاستهلاك عند الرنين . وتستخدم الدوائر ذات الرنين الحاد مثل هذه الدائرة فى أجهزة استقبال الراديو الحساسة ، كما سنرى فى الفصل التالى .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الثابت الزمنى RC ؛ (ب) التيار المتردد فى مقابل التيار المستمر من حيث التيار وفرق الجهد ، (جـ) القيم الفعالة وقيم (rms) ، (د) الرد (المفاعلة) السعوى ، (هـ) الرد (المفاعلة) الحثى ، (و) المعاوقة ، (ز) مُعامل القدرة ، (ح) الرنين فى دائرة LC .

2 أن ترسم منحنيات التيار والشحنة فى دائرة RC أثناء الشحن والتفريغ . أن تعرف الثابت الزمنى للدائرة وتربطه بالمنحنيات .

3 أن ترسم منحنى نموذجيًا للجهد أو التيار المترددين مبينًا عليه القيم العظمى والمتوسطة و (rms) . أن تربط قيمة (rms) بالقيمة عند القمة بشكل كمى (فى صورة معادلة رياضية) .

4 أن تذكر صورة قانون أوم التى تنطبق على جهد متردد مطبق على مقاوم . وأن ترسم منحنيات بيانية لعلاقة التيار بفرق الجهد على نفس الرسم . وأن تحسب متوسط فقد القدرة فى المقاوم عندما تتوافر لديك البيانات اللازمة .

5 أن تفسر لماذا يكون التأثير المعاوق للمكثف أكبر عند الترددات المنخفضة عنه عند الترددات المرتفعة . وأن تستخدم العلاقة $V = IX_C$ فى حالات بسيطة .

6 أن ترسم ـ تخطيطيًا ـ منحنيات العلاقة بين التيار وفرق الجهد بالنسبة لمكثف يتصل بمصدر قدرة متردد التيار . وأن تذكر متوسط فقد القدرة فى المكثف .

7 أن تفسر السبب فى أن التأثير المعاوق لملف محاثة لابد وأن يكون أكبر عند الترددات المرتفعة عنه عند الترددات المنخفضة . وأن تستخدم العلاقة $V = IX_L$ فى حالات بسيطة .

8 أن ترسم ـ تخطيطيًا ـ منحنيات العلاقة بين التيار وفرق الجهد بالنسبة لملف محاثة يتصل بمصدر قدرة متردد التيار . وأن تذكر متوسط فقد القدرة فى ملف المحاثة .

9 أن تستخدم العلاقة $V = IZ$ بالنسبة لمسائل بسيطة تتضمن دوائر LRC متصلة على التوالى .

10 أن تستخدم العلاقة $V = IZ$ لتفسر لماذا يوجد تردد رنين لدائرة LC . وأن تبين كيف تحصل على تردد الرنين .

أسئلة وتخمينات

1 إذا أعطيت مكثفًا سعته $2\mu\text{F}$ وخلية جافة وجهازًا حساسًا متعدد الأغراض لقياس التيار ، فكيف تستعملها فى قياس مقاومة يظن أنها حوالى $10^8\ \Omega$؟ وهل تستطيع القيام بالقياسات باستخدام فولتميتر عادى بدلاً من جهاز قياس التيار ؟

2 يستخدم فى بعض الأماكن أحيانًا جهد منخفض التردد (أقل بكثير من 60 Hz) وترتعش الأضواء الكهربية التى يغذيها مثل هذا الجهد . اشرح السبب فى حدوث هذا الارتعاش .

3 فى أى من هذه التطبيقات يكون استخدام جهد ذى تيار مستمر أو تيار متردد مقبولاً على قدم المساواة : ضوء متوهج ، موقد كهربائى ، التحليل الكهربى ، جهاز تليفزيون ، إضاءة فلورية (فلورسنت) ، محول لأحد إعلانات النيون ، جهاز شحن البطاريات ، محمصة الخبز ، ساعة كهربائية ؟

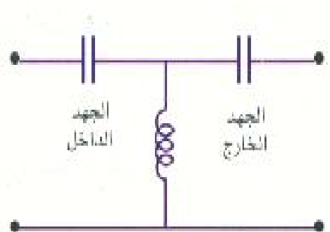
4 ما هى أوجه التماثل بين اهتزاز كتلة مثبتة على ياى (زنبرك) وذبذبة دائرة LC ؟ ما هى المقادير المناظرة للمحاثة L والسعة C فى النظام الميكانيكى ؟ اشرح .

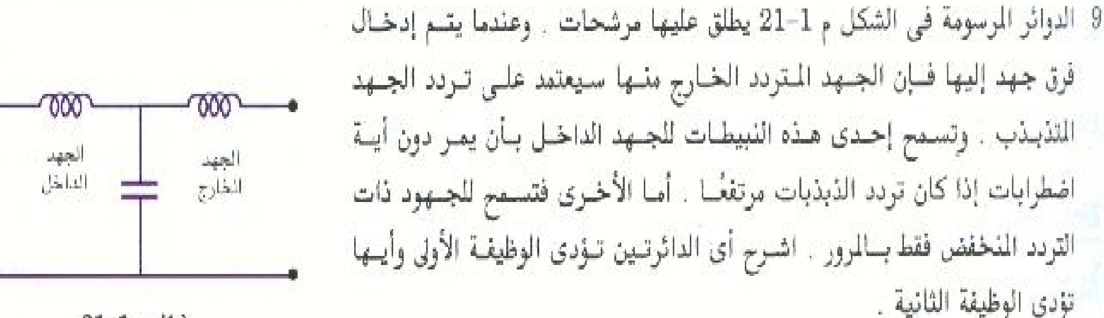
5 قارن بين معادلتى تردد الرنين الخاص بكتلة تهتز عند طرف زنبرك والرنين بالنسبة لدائرة LC . ما هى أوجه التماثل بينهما .

6 يتصل فولتميتر يعمل بالتيار المستمر عبر طرفى مذبذب متغير التردد . كيف يكون سلوك الجهاز القياسى عند تغير تردد الجهد المتذبذب ببطء من 0.01 إلى 100 Hz ؟ اشرح .

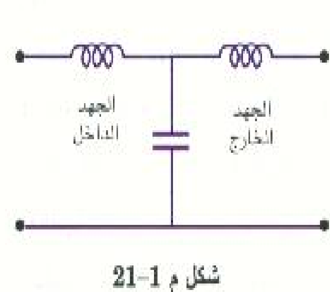
7 متى يكون التيار خلال دائرة LRC متصلة على التوالى متفقًا فى الطور مع جهد المصدر ـ إن كان هذا ممكنًا على الإطلاق ـ ؟

8 نشر هذا التصريح فى إحدى الجرائد اليومية : « صرح مدير الصحة بالمدينة بتحذير من أن الأجهزة الكهربائية المنزلية يمكن أن تحدث إصابات قاتلة . وقد جاءت هذه التحذيرات عقب مصرع فتى يبلغ من العمر ثمانية عشر عامًا عندما صعق بالكهرباء عند إدخال شوكة طعام فى محمصة الخبز . وقد أشار مدير الصحة السيد . د . سميث بأنه حتى البالغين يمكن أن يُقتلوا بمثل هذه الصدمات الكهربائية وأن التيار المنزلى المعتاد هو 110 V ولكن الجهد يزداد إذا وصل التيار بالأرض » . ما هو الخطأ فى الجملة الأخيرة وكيف يمكن تصويبها ؟





9 الدوائر المرسومة فى الشكل م 1–21 يطلق عليها مرشحات . وعندما يتم إدخال فرق جهد إليها فإن الجهد المتردد الخارج منها سيعتمد على تردد الجهد المتذبذب . وتسمح إحدى هذه النبيطات للجهد الداخل بأن يمر دون أية اضطرابات إذا كان تردد الذبذبات مرتفعًا . أما الأخرى فتسمح للجهود ذات التردد المنخفض فقط بالمرور . اشرح أى الدائرتين تؤدى الوظيفة الأولى وأيها تؤدى الوظيفة الثانية .



شكل م 1–21

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

قيم جذر متوسط المربعات (rms)

العلاقة بين سعة تيار أو جهد يتغير جيبيًا (i_0 و v_0) وقيم (rms) (I و V) هى كالتالى :

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{R}} \quad , \quad V = \frac{v_0}{\sqrt{2}}$$

خلاصة

1 إن قيم rms هى التى تدخل فى حساب القدرة التى يوفرها جهد المصدر أو التى تتحول إلى حرارة فى مقاوم ما :

$$P = IV_R = I^2R$$

2 ونتيجة لما سبق فإن السعات يمكن اشتقاقها من قيم rms بالعلاقة :

$$v_0 = (\sqrt{2})V = 1.414\ \text{V} \quad , \quad i_0 = (\sqrt{2})I = 1.414\ I$$

تغير الشحنة مع الزمن فى دائرة RC متصلة على التوالى

تنمو الشحنة (ومن ثم الجهد) على مكثف فى دائرة RC عند إغلاق المفتاح تبعًا للعلاقة التالية :

$$q(t) = q_f(1 - e^{-t/T_C})$$

حيث $q_f = CV_C$ و $T_C = RC$ وهو الثابت الزمنى السعوى .

علاقات الطور بين التيار والجهد فى دوائر التيار المتردد

دائرة مقاومة نقية يكون التيار والجهد اللحظيان متفقين فى الطور .

دائرة سعة نقية يتقدم التيار اللحظى على الجهد بمقدار 1/4 دورة .

دائرة محاثة نقية يتقدم الجهد اللحظى على التيار بمقدار 1/4 دورة .

العلاقة بين I و V فى دوائر التيار المتردد : الردود (المفاعلات)

دائرة مقاومة نقية $V = IR$ (قانون أوم) .

دائرة سعة نقية $V = IX_C$

حيث $X_C = \dfrac{1}{2\pi fC}$ هى الرد السعوى (المفاعلة السعوية)

دائرة محاثة نقية $V = IX_L$

حيث $X_C = 2\pi fL$ هى الرد الحثى (المفاعلة الحثية)

خلاصة

1 وحدة كل من R و X_C و X_L هى الأوم .

2 لا تعتمد المقاومة على التردد ، بينما تعتمد الردود X_L و X_C على كل من التردد وقيم L و C على الترتيب .

3 ينطبق قانون أوم بالنسبة للمقاومات على قيم v و i اللحظية وعلى قيم rms أيضًا لأنهما متفقان فى الطور . أما العلاقة المكافئة لقانون أوم بين التيار والجهد بالنسبة للمكثفات وملفات المحاثة فتنطبق **فقط** على قيم rms وقيم سعة الذبذبة ولا تنطبق على v و i لأنهما مختلفان فى الطور عبر C و L .

العلاقة بين V و I فى دائرة LRC المتصلة على التوالى ويغذيها تيار متردد

يرتبط V و I خلال معاوقة الدائرة Z فى دائرة LRC المتصلة على التوالى :

$$V = IZ$$

حيث

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

خلاصة

1 تؤدى علاقات الطور المتعاكسة بين v و i بالنسبة للمكثفات وملفات المحاثة إلى أن تأثيراتهما تطرح . ثم يضاف الفرق بينهما إلى المقاومة بطريقة جمع المتجهات .

2 فى دائرة RL تكون $X_C = 0$ وتكون $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.

3 فى دائرة RC تكون $X_L = 0$ وتكون $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$.

زاوية الطور في دوائر LRC

تعطى زاوية الطور ϕ المحصورة بين v و i فى دائرة LRC بالمعادلة :

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} \quad \text{أو} \quad \phi = \cos^{-1}\frac{R}{Z}$$

خلاصة

1 إذا كان $X_C > X_L$ فإن الجهد اللحظى يتخلف عن التيار بزاوية الطور هذه .

2 إذا كان $X_L > X_C$ فإن الجهد اللحظى يسبق التيار بزاوية الطور هذه .

الرنين في دوائر LRC

عند تردد الرنين f_0 حيث $X_L = X_C$ ، تتلاشى الردود وتبقى $Z = R$ وهذه هى أقل قيمة للمعاوقة Z ولذا فعندها يمر أقصى تيار ممكن . وتسمى هذه الحالة رنينًا ويسمى f_0 تردد الرنين .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

خلاصة

1 تعمل دائرة LRC عند الرنين كما لو كانت دائرة مقاومة صافية . $I = V/R$ ويصبح الجهد والتيار متفقين فى الطور $(\phi = 0)$.

القدرة في دوائر التيار المتردد

مُعامل القدرة يطلق على المقدار $\cos\phi$ مُعامل القدرة لدائرة تيار متردد ومتوسط القدرة الواصلة إلى دائرة تيار متردد هو :

$$P = IV\cos\phi = IV\left(\frac{R}{Z}\right)$$

استهلاك القدرة يتم متوسط استهلاك القدرة (تحولها إلى حرارة) فى دائرة تيار متردد داخل المقاومة R بالكامل :

$$P\ (\text{فى } R) = I^2R$$

وليس هناك أى قدرة مستهلكة فى مكثف أو ملف محاثة .

مسائل

القسم 1-21

1 إذا كان الثابت الزمنى لدائرة RC هو $4.0\ s$ فكم تبلغ قيمة المقاوم الواجب توصيله على التوالى مع مكثف سعته $0.50\ \mu F$ ؟

2 ما مقدار الوقت الذى يستغرقه تيار الشحن لكى يهبط إلى ثلث $1/3$ قيمته الأصلية عندما يشحن مكثف سعته $3.0\ \mu F$ من خلال مقاوم مقداره $10\ M\Omega$ بواسطة بطارية قوتها $9.0\ V$ ؟

3 تتكون دائرة متصلة على التوالى من مكثف غير مشحون سعته $4.0\ \mu F$ ومقاوم مقداره $6.0\ M\Omega$ وبطارية $12\ V$ ومفتاح . ما مقدار التيار المار فى الدائرة والشحنة التى على المكثف . (أ) بعد قفل المفتاح مباشرة ؟ و (ب) بعد مرور ثابت زمنى واحد ؟

4 تتكون دائرة متصلة على التوالى من مكثف سعته $6.0\ \mu F$ مشحون إلى جهد قيمته $9\ V$ ومفتاح ومقاوم قيمته $50\ M\Omega$. ما مقدار التيار المار فى الدائرة وفرق الجهد عبر المكثف . (أ) عند غلق المفتاح أول مرة (ب) بعد مرور ثابت زمنى واحد بعد غلق المفتاح .

▪ 5 تتكون دائرة متصلة على التوالى من بطارية $9.0\ V$ ومقاوم مقدار $4\ M\Omega$ ومكثف سعته $5.0\ \mu F$ ومفتاح مفتوح . وكان المكثف فى البداية غير مشحون . ثم اقفل المفتاح . (أ) ما هو الثابت الزمنى للدائرة ؟ (ب) كم من الوقت يستغرق المكثف حتى يشحن إلى ثلثيه $(2/3)$ ؟ (جـ) ما مقدار الشحنة التى ستسرى إلى المكثف فى الزمن المحسوب فى الفقرة (ب) ؟ (د) ما هو متوسط التيار تقريبًا الذى يسرى إلى المكثف خلال هذه الفترة ؟

■ 6 افترض أنك تقوم بقياس مقاومة جسمك فيما بين يديك بواسطة أوميتر ووجدت إنـها 62 kΩ . ثم شحن مكثـف سعته 20.0 μF حتى جهد مقداره 12.0 V وفصل ، ثم قمت أنت بإمساك طرفى المكثف ، كل طرف بيد . (أ) ما هو الثابت الزمنى للدائرة ؟ (ب) ما هو فرق الجهد عبر المكثف تقريبًا بعد مرور 0.8 s ؟ (جـ) ما هـى الشحنـة علـى المكثـف عندمـا يكون فرق الجهد عبره هو 9.0 V ؟ (د) ما هو متوسط التيار تقريبًا ، والذى يسرى خلال جسدك فى فترة 0.8 s ؟

■ 7 شحن مكثف متصل على التوالى مع مقاومة وبطارية . ما هى النسبة المئوية للشحنة على المكثف بعـد مـرور ثـابتين زمنيـين بعد إقفال المفتاح ؟

■ 8 وصل مكثفان سعتاهما 3.0 μF و 6.0 μF على الترتيب ، على التوالى مع مقاوم 5.0 MΩ وبطارية 9.0 V ومفتاح مفتوح . (أ) ما هو الثابت الزمنى للدائرة ؟ (ب) ما هو فرق الجهد عبر المكثف 6.0 μF بعد ثابت زمنى واحد ؟ (جـ) مـا مقـدار الشحنة التى وصلت إلى المكثف 3.0 μF خلال هذه الفترة ؟

القسمان 2–21 و 3–21

9 وصل أميتر للتيار المتردد على التوالى مع مصباح إنارة متوهج فقرأ 0.4 A وقرأ فولتميتر للتيار الـمتردد الجـهد عـبر المصباح فكانت القراءة 110 V . ما هى القيمة القصوى (القممية) للتيار المار خلال المصباح وما هو أقصى فرق جهد عبره ؟

10 طبق فرق جهد قيمة rms له 110 V على جهاز كهربائى مقاومته 15 Ω . ما هو أقصى تيار يمر خلال الجهاز . ومـا هـى قيمة rms له ؟

11 مرر تيار خلال بصيلة متوهجة فكانت قراءة أميتر التيار المتردد هو 0.72 A وقراءة فولتميتر تيار متردد متصل مـع البصيلـة على التوازى هو 120 V . (أ) ما هو التيار الأقصى (القممى) وفـرق الجـهد القممـى للبصيلـة ؟ مـا مقـدار القـدرة التـى تستهلكها البصيلة ؟ ما هى مقاومة البصيلة ؟

12 ما هى مقاومة بصيلة إضاءة تستهلك قدرة متوسطة قيمتها 60 W عند توصيلـها بمصـدر قـدره تـردده 60 Hz وقيمـة rms لجهده هى 110 V ؟

13 ما مقدار التيار الذى تسحبه محمصة خبز قدرتها 900 W وتعمل عند جهد 110 V من خط قدرة للتيار المتردد جـهده هـو 110 Vrms ؟ ما مقاومة محمصة الخبز أثناء التشغيل العادى ؟ ما مقدار ما تولده من سعرات حرارية خلال 5 دقائق ؟

■ 14 وصلت بصيلتا إضاءة قدرة كل منهما 120 W وبصيلة قدرتها 90 W على التوازى مع مصدر منزلى يوفر 110 Vrms متردد . أوجد قيمة rms للتيار ومقاومة كل من البصيلات .

■ 15 يعطى التيار المار خلال مقاوم 40 Ω بالعلاقة $i = \sin 240\, tA$. ما مقدار القدرة التى يبددها التيار خلال المقاوم ؟

■ 16 مصدر للجهد يعطى جهدًا يعبر عنه بالعلاقة $v = 120 \sin 377\, tV$. أوجد (أ) تـردد المصدر ، (ب) قيمـة rms للجهد عند الخرج و (جـ) الجهد عند اللحظة $t = (1/15)$ s .

■ 17 ما هى القيمة القصوى وقيمة rms للتيار عند يوصل المصدر المذكور فى المسألة رقم 16 بمقاومة مقدارها 60 Ω ؟ وما مقـدار القدرة التى يبددها المقاوم ؟

■ 18 طبق جهد صورته $v = 60 \cos 300\, tV$ عبر مقاوم 25 Ω . ما مقدار القدرة المبددة فى المقاوم ؟

■ 19 يبلغ جهد الخرج فى مولد تيار متردد v_0 ويزداد $v = 0.3\, v_0$ عند $t = 0.004$ s ما هو تردد المولد ؟ (اعتبر $v = 0$ عند $t = 0$) .

■ 20 وصل مصدر 60 Hz و 110 V للتيار المتردد عبر مقاوم 30 Ω . (أ) أوجد التيار المسحوب من مصدر الجهد . (ب) كـرر الحسابات إذا كان التردد 5000 Hz . (جـ) ما مقدار القدرة المبددة فى كل حالة .

■ 21 يأخذ التيار المار فى دائرة مقاومة فى الزيادة عند $t = 0.004$ s وتصل قيمته إلى 72 فى المائة من القيمة القصـوى . مـا هـو تردد المصدر ؟ (اعتبر $i = 0$ عند $t = 0$) .

القسم 4-21

22 ما هى قيمة rms للتيار الذى يسحبه مكثف سعته $4.0\,\mu F$ من مصدر 110 V, 60 Hz يتصل عبره مباشرة ؟ كرر الحسابات بالنسبة لمصدر آخر 110 V, 60,000 Hz .

23 وصل مكثف $3.0\,\mu F$ مباشرة عبر مصدر 240 Hz , 60 V . ما مقدار قيمة rms للتيار المسحوب من المصدر ؟ كرر الحسابات لمصدر آخر تردده 0.4 MHz .

24 يبلغ الرد السعوى لمكثف فى دائرة ما 40 Ω عندما كان تردد المصدر 120 Hz ما هو الرد السعوى للمكثف إذا تغير تردد المصدر إلى 10,000 Hz ؟

25 وصل مصدر للتيار المتردد يوفر جهدًا قيمة rms له 42 V وتردده 90 Hz بمكثف سعته $2.8\,\mu F$ مباشرة . ما هى قيمة rms للتيار الواصل إلى المكثف من المصدر ؟

■ 26 وصل مصدر للتيار المتردد تردده 60 Hz والقيمة القصوى للجهد الخارج منه 170 V بمكثف مجهول السعة مباشرة . ما هى سعة المكثف التى تؤدى إلى سحب تيار قيمة rms له 0.72 A ؟

■ 27 يمر تيار قيمة rms له 0.4 A فى دائرة تحتوى على مكثف سعته $5.0\,\mu F$ متصل بمصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده 40 V . ما هو تردد المصدر ؟

■ 28 يتصل مكثف سعته $8.0\,\mu F$ مباشرة بمصدر للقدرة 220 V, 50 Hz . (أ) ما هى القيمة المتوسطة للقدرة التى يستهلكها المكثف ؟ (ب) ما قيمة rms للتيار المار فى المكثف ؟ (جـ) ما هى الشحنة القصوى على المكثف ؟

■ 29 ما هو معامل التغير بالنسبة للتيار المار إلى مكثف عندما يتغير تردد الجهد المطبق عبره بحيث يزيد بمعامل مقداره (أ) 10 ، (ب) 100 ، و (جـ) 10,000 ؟ اعتبر أنه ليست هناك مقاومة للدائرة وأن مقدار جهد المصدر يبقى ثابتًا .

■ 30 وصل مكثفان $2.0\,\mu F$ و $6.0\,\mu F$ على التوالى عبر مصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده 240 V وتردده 50 Hz . ما هى أقصى شحنة على كلٍ من المكثفين ؟

القسم 5-21

31 أوجد الرد الحثى لملف محاثته 4.0 mH عند تردد مقداره (أ) 60 Hz ، (ب) 600 kHz .

32 إذا أريد أن يكون الرد الحثى لملف محاثة هو 32 Ω عندما يكون التردد 1200 Hz . فما هى قيمة محاثته ؟ وما هو الرد الحثى له عند 6.0 Hz ؟

33 احسب محاثة ملف له رد حثى مقداره 60 Ω عندما يكون التردد الزاوى للمصدر 1508 rad/s .

34 وصل ملف محاثة بمصدر قدرة تردده 30 Hz وقيمة rms لجهده 50 V . ما هى قيمة المحاثة المطلوبة حتى يكون أقصى تيار يمر بالدائرة تحت 90 mA ؟

35 بلغ فرق الجهد بين طرفى دائرة حث نقية بقيمة rms هو 110 V . (أ) احسب محاثة الملف إذا كانت قيمة (rms) للتيار هى 8 A وتردده 60 Hz . (ب) ما هو التردد الذى يخفض قيمة rms للتيار إلى نصف مقدارها الأصلى ؟

■ 36 وصل مصدر جهد متردد مباشرة عبر ملف محاثة مثالى 30 mH فمر تيار بقيمة (rms) 0.8 A عندما كانت القيمة القصوى لفرق الجهد 9 V . (أ) ما هو تردد المصدر ؟ (ب) إذا ضوعف التردد ثلاث مرات وظل الجهد ثابتًا كما هو أى 9.0 V فكم تكون قيمة rms للتيار المار فى الملف ؟

■ 37 بلغ الرد الحثى لملف ما 78 Ω عند تردد قدره 60 Hz . كم يبلغ أقصى تيار إذا وصل هذا الملف بمصدر تردده 50 Hz وفرق الجهد 220 V rms ؟

■ 38 وصل مصدر للجهد المتردد مباشرة عبر ملف محاثة عديم المقاومة 1.2 mH . كم يبغ فرق الجهد الذى يجعل تيارا مقداره 1.80 A يمر إذا كان التردد هو (أ) 50 kHz و (ب) 500 kHz ؟

القسم 6-21

39 وصل مقاوم 40 Ω على التوالى مع مكثف 30 μ F ومولد للتيار المتردد قيمة rms لجهده هى 80 V وتردده 60 Hz . أوجد (أ) قيمة rms للتيار المار فى الدائرة ، (ب) فرق الجهد عبر المكثف ، (جـ) زاوية الطور بين التيار والجهد اللحظيين .

40 وصل مكثف 4.0 μ F ومقاوم 400 Ω على التوالى عبر مصدر للقدرة 30 V – 120 Hz . أوجد التيار المار فى الدائرة والقدرة المسحوبة من المصدر .

■ 41 وصل مكثف 50 Ω على التوالى مع مكثف 6.0 μ F عبر مصدر للجهد . ما هو التردد الذى تكون عنده قيمة rms عبر المقاوم هى نفسها عبر المكثف ؟

■■ 42 تتكون دائرة متصلة على التوالى من مصدر للقدرة 60 V – 1200 Hz و مقاوم 1 kΩ ومكثف مجهول السعة . وكان rms للجهد عبر المقاوم 42 V . ما هو التيار المار فى الدائرة وما قيمة المكثف ؟

43 وصل ملف محاثة 4.0 mH مقاومته 200 Ω مباشرة عبر مصدر قدرة 30 V – 6000 Hz . أوجد التيار المار فى الدائرة والقدرة المسحوبة من المصدر .

44 وصل ملف محاثة مثالى 5 mH على التوالى مع مقاوم 60 Ω عبر مصدر للجهد المتردد متغير القيمة . ما هو التردد الذى يكون عنده rms للجهد عبر المقاوم هو نفس المقدار عبر ملف المحاثة ؟

■■ 45 وصل ملف محاثة مجهول L على التوالى مع مقاوم 800 Ω ومصدر للقدرة 90 V – 2000 Hz . وكان فرق الجهد عبر المقاوم هو 40 V . ما هو التيار المار فى الدائرة وما هى قيمة المحاثة ؟

46 ما هو التردد الذى يكون فيه الرد السعوى لمكثف سعته 70 μ F مساويًا للرد الحثى لمحاثة مقدارها 70 mH ؟

47 وصل مصدر تردده 60 Hz عبر مكثف سعته 40 μ F . ما هو ملف المحاثة الذى يسحب نفس التيار عند توصيله عبر نفس المصدر ؟

■ 48 وصل مكثف سعته 3.0 μ F مع ملف محاثة على التوالى عبر مصدر 110 V – 60 Hz . وكانت محاثة الملف 0.6 mH ومقاومته 720 Ω . (أ) أوجد التيار المار فى الدائرة . (ب) أعد الحسابات بالنسبة لتردد قيمته 6000 Hz .

■ 49 ما هى قيمة المحاثة الواجب توصيلها على التوالى مع مكثف سعته 6 μ F ومقاوم 40 Ω ، ومصدر للقدرة 50 – 240 V Hz إذا كانت rms للتيار المار فى الدائرة هى 3.2 A ؟

■ 50 وصل مقاوم 50 Ω مع ملف محاثة 80 mH ومكثف سعته 40 μ F على التوالى مع مصدر للتيار المتردد 60 Hz – 90 V . أوجد فرق الجهد (أ) عبر المجموعة RC و (ب) عبر المجموعة LC .

■ 51 تتكون دائرة LRC من مقاوم 50 Ω ، ومكثف 12 μ F ، وملف محاثة 240 mH بحيث تتصل معًا على التوالى ، مع مصدر للقدرة 60 Hz – 110 V . (أ) ما هى زاوية الطور بين التيار والجهد المطبق ؟ هل يقود التيار فرق الجهد أم يتخلف وراءه ؟

■ 52 وصل مقاوم 100 Ω ومكثف سعته 20 μ F وملف محاثة محاثته 180 mH على التوالى مع مصدر قدرة 60 Hz – 110 V . أوجد (أ) التيار المار فى الدائرة ، (ب) فرق الجهد عبر المجموعة LC ، (جـ) فقد القدرة فى الدائرة ، (د) ومعامل القدرة .

■ 53 يسحب ملف محاثة تيارًا مقداره 0.8 A عندما يتصل عبر بطارية قوتها 12 V ، وتيارًا مقداره 3.6 A عندما يتصل بمصدر للتيار المتردد ذى ق.د.ك 110 V وتردده 60 Hz . ما هى محاثة الملف وما مقدار القدرة التى يسحبها من مصدر التيار المتردد ؟

54 ملف محاثته 300 mH ومقاومة مقدارها 120 Ω يمكن اعتبارها متصلة على التوالي معه . ما هو التردد الذي تكون المعاوقة عنده 144 Ω ؟

55 تبلغ مقاومة دائرة *LRC* على التوالي 100 Ω وتبلغ معاوقتها 210 Ω . ما هو متوسط القدرة التي ستبدد في الدائرة إذا وصلت بمصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده 110 V ؟

■ 56 وصل ملف محاثة ومكثف ومقاوم على التوالي عبر مصدر للقدرة . وكانت قيم rms للجهود كالتالي : 120 V عبر ملف المحاثة ، 60 V عبر المكثف ، 60 V عبر المقاوم . أوجد (أ) القيمة القممية لجهد المصدر و (ب) زاوية الطور بين i و v .

القسم 7-21

57 (أ) ما هي سعة مكثف يعطي تردد رنين مقداره 60 Hz عند توصيله على التوالي مع ملف محاثة 0.40 mH ؟ (ب) ما هو ملف المحاثة المطلوب ليحدث رنينًا عند نفس التردد مع مكثف سعته 6 μ F ؟

58 عند توصيل ملف محاثة على التوالي مع مكثف سعته 5.0 μ F فإنه يحدث رنينا حادًا عند تردد مقداره 720 Hz . ما هي قيمة محاثة الملف ؟

■ 59 يؤثر مصدر اهتزازات متغير التردد على دائرة متصلة على التوالي ومكونة من $R = 1600\ \Omega$ ، $L = 400$ mH ، $C = 10\ \mu$ F . (أ) ما هو تردد رنين الدائرة ؟ (ب) ما هي معاوقة الدائرة عند تردد الرنين ؟

■ 60 تستخدم دائرة *LRC* في جهاز راديو لضبط محطة FM الإذاعية عند 96.5 MHz . وقد كانت قيمة المحاثة في الدائرة 1.44 MH والمقاومة 14 Ω . ما هي قيمة سعة المكثف الواجب استخدامها لالتقاط هذه المحطة ؟

■ 61 يستخدم مكثف متغير السعة في دائرة تناغم لترددات AM الإذاعية في المدى من 500 إلى 1600 kHz . وإذا استخدمت محاثة مقدارها 4 μ H على التوالي مع المكثف فما هي القيم الطرفية لسعة المكثف المتغير حتى يمكن تغطية مدى الترددات المذكور .

■■ 62 وصل مقاوم 30 Ω ومكثف 3 μ F وملف محاثة 4 mH على التوالي مع مصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهد الخرج لديه هي 60 V . أوجد . (أ) ترد الرنين لهذه الدائرة ؛ (ب) التيار المار عند تردد الرنين ؛ (جـ) القدرة الواصلة إلى الدائرة عند تردد مقداره نصف تردد الرنين .

مسائل إضافية

■ 63 عندما يوصل مكثف سعته 3.0 μ F عبر مصدر للتيار المتردد قيمة rms لجهده هي 9.0 V فإن قيمة rms للتيار المار من خلاله تكون 20.0 mA . (أ) ما هو التردد العامل في هذا المصدر ؟ (ب) إذا حل ملف مثالي محاثته 0.2 H محل المكثف فما هي قيمة rms للتيار المار خلال الملف ؟

■■ 64 وصلت دائرة *LRC* قيمة R بها 60 Ω عبر مصدر للتيار المتردد تردده 300 Hz و rms لجهده 180 V . وكانت rms للجهد هي نفسها عبر كلٍ من عناصر الدائرة . (أ) ما قيمة فرق الجهد عبر ملف المحاثة النقي ؟ (ب) ما هي قيم كلٍ من L و C ؟

■■ 65 وصلت محاثة مقدارها 0.8 H على التوالي مع مصباح فلورسنتي لتحديد قيمة التيار المار خلال المصباح . ثم وصلت المجموعة بخط قدره يتيح 110 V - 60 Hz . فإذا كان فرق الجهد عبر المصباح 48 V . فما هو التيار المار في الدائرة ؟ اعتبر أن المصباح بمثابة حمل ذي مقاومة صرفة .

■■ 66 يبلغ تردد رنين دائرة *LRC* متصلة على التوالي $2400/\pi$ Hz . وعند تشغيل الدائرة عند تردد معين أعلى من تردد الرنين فإن الدائرة يصبح لها رد حثي مقداره 14 Ω ورد سعوي مقداره 9 Ω . ما هي قيم المحاثة والسعة في الدائرة ؟

■■ 67 وصل مقاوم وملف محاثة على التوالي بمصدر يتيح 120 V - 60 Hz . وكان فرق الجهد عبر المقاوم هو 54 V والقدرة المبددة في الدائرة هي 16 W . ما هي قيمة المقاومة والمحاثة في الدائرة ؟

الجزء الرابع

الضوء والبصريات

البحث هو أن ترى ما رآه الآخرون
وأن تفكر فى مالم يفكر فيه أحد
ألبرت شنت - كيورى

من أكثر الموضوعات جاذبية وخلبًا للب ، والتى تناولـها العلماء بالبحث ، موضوع الضوء وعملية الرؤية . فنحن نعتمد عادة على حاسة البصر لدينا وعلى إدراكنا للألوان أكثر من اعتمادنا على أية حاسة أخرى لكى نكون معلومات مفصلة عن العالم من حولنا . وقد اكتشف البشر ـ على امتداد القرن السابع عشر ـ كيفية انعطاف الضوء (انكساره) عندما يمر من وسط إلى آخر ، وكيف ينعكس ، وكيف ينطوى الضوء الأبيض على طيف من الألوان . وكان من نتاج هذه المعرفة ابتكار العدسات والمرايا التى مكنتنا صناعتها من جعل الفلك يصبح كيانًا حقيقيًا كعلم يقوم على الرصد وأن يزدهر خلال القرن الثامن عشر .

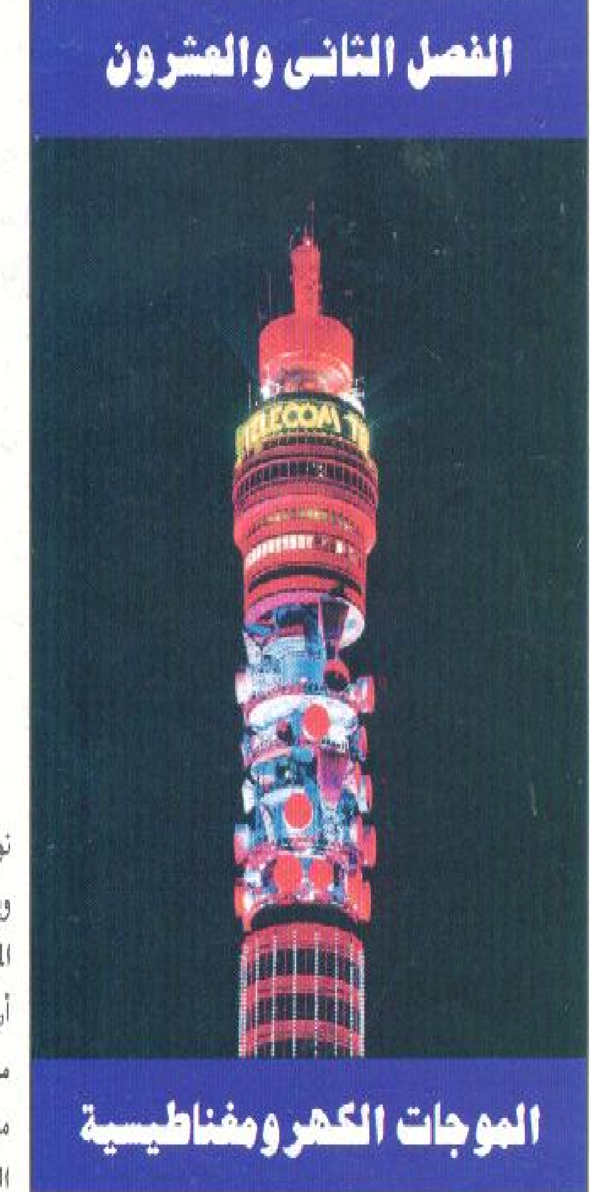
وقد أحدث القرن التاسع عشر زيادة متفجرة فى فهمنا لخواص الضوء مثلما فعل فى بقية فروع الفيزياء التقليدية ؛ إذ اكتشف تداخل واستقطاب الموجات وقيست سرعة الضوء بدقة فى كل من الماء والهواء . وأدى استخدام الأجهزة المشتملة على منشورات زجاجية ومحزوزات الحيود إلى تحليل أطياف الضوء الصادر من مصادر متنوعة وبذلك ولد مجال دراسة الأطياف . وكانت تلك الأطياف مدخلاً لفهم تركيب الذرة خلال بدايات القرن العشرين . وقد بلغت نظريات الضوء أوجها مع معادلات ماكسويل التى وحدت بين دراسة البصريات من جهة والكهربية والمغناطيسية من جهة أخرى ، حيث تنبأت بوجود موجات كهرومغناطيسية فى مدى شاسع جدًا من الأطوال الموجية .

وكلما تقدمنا فى فهم الضوء ، كلما أصبحنا قادرين على ابتكار نظم تتيح لنا أن نرى بوضوح أكبر ونرى أبعد وبتفاصيل أدق بكثير عما هو ممكن بالعين المجردة . لقد أصبحنا نستطيع قياس مسافات أصغر وفترات زمنية قصيرة للغاية مما أضفى المزيد من الدقة على عمليات التصنيع ، وإلى ظهور مفاتيح أسرع للتحكم وأدوات حس أكثر حساسية ووسائل لمعالجة تخزين المعلومات أسرع وأكثر وثوقًا وأكفأ عن ذى قبل .

لقد بدأ بالكاد إحساسنا بأهمية الضوء فى حياتنا على الرغم من وضوح ذلك من خلال حاسة البصر لدينا . وستستمر تطبيقات الضوء فى الاتصالات والحسابات والصناعة إلى جانب مجالات أخرى كثيرة ، فى النمو والزيادة بمعدلات مذهلة . وإذا كان التحكم فى الإلكترونات من خلال علوم الإلكترونات قد كان سمة القرن الحالى ، فإن التحكم فى الفوتونات ـ علم الفوتونيات ـ سيكون هو سمة القرن الحادى والعشرين .



الفصل الثانى والعشرون



الموجات الكهرومغناطيسية

نواجه فى حياتنا اليومية العديد من صور الظواهر الموجية . ويتجلى تركيب الموجة لنا فى الموجات التى تظهر على صفحة الماء فى بحيرة أو غيرها وفى اهتزاز أوتار عود أو جيتار . على أن تركيب الموجات لا يمكن رؤيته فى حالة أنواع أخرى مثل موجات الصوت مثلاً ، وإن كنا نعرف من دراساتنا السابقة أن موجة الصوت تتكون من اهتزازات تحدث فى ضغط جزيئات الهواء . كما أن هناك نوعًا آخر من الموجات التى لا يكون تركيبها ظاهرًا لنا ، ومثالها الموجات اللاسلكية ، وموجات الضوء والموجات تحت الحمراء والموجات الميكروئية (الدقيقة) . وتستطيع كل هذه الموجات الانتقال وحمل الطاقة خلال الفضاء الفارغ مما يثير سؤالاً حول ماهية ما يتموج فى الفراغ . ويطلق على الموجات المذكورة توًا اسم **الموجات الكهرومغناطيسية** وطبيعة هذه الموجات هى موضوع دراستنا فى هذا الفصل .

22-1 المجالات الكهربية والمغناطيسية المهتزة ؛ معادلات ماكسويل

يعتبر تفسير الموجات الكهرومغناطيسية على يدى الفيزيائى الأسكتلندى جيمس كلارك ماكسويل (1831 - 1879) أحد أعظم الإنجازات فى تاريخ العلم . وقد وضع ماكسويل نظريته فى ستينيات القرن التاسع عشر . وقبل أن نشرع فى التعرف على عمله سنقوم بمراجعة لما كان معروفًا حول الكهربية والمغناطيسية حتى ذلك الوقت .

بحلول منتصف القرن التاسع عشر ، استقرت المبادئ الأساسية التالية والتى درسنا كلاً منها فى الفصول السابقة :

1 وجود شحنة موجبة وأخرى سالبة وقانون كولوم للقوة بين شحنتين . تم الاستقرار على أن الشحنات هي مصدر المجالات الكهربية بحيث تنطلق المجالات من الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة .

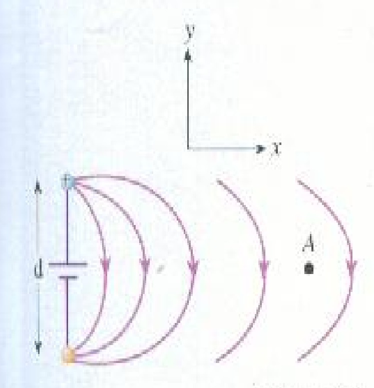
2 استقر أيضًا أن الشحنات المتحركة أو التيارات هي مصدر المجالات المغناطيسية ويصف قانون أمبير العلاقة بين التيار الكهربي والمجال المغناطيسي .

3 تتكون خطوط المجال المغناطيسي من حلقات مقفلة ، لا بداية لها ولا نهاية ، ويعد هذا تعبيرًا عن أنه لا وجود للأقطاب الأحادية ، وأن الأقطاب المغناطيسية تتواجد دائمًا على هيئة أزواج متضادة ، شمالية وجنوبية .

4 يمكن توليد مجال كهربي بواسطة مجال مغناطيسي تتغير شدته مع الزمن ؛ ويلخص هذا قانون فاراداى للحث .

من المهم تذكر أن الصيغة الرياضية لهذه المبادئ الأساسية تحتوى على ثابتين فيزيائيين هما μ_0 و ϵ_0 وقد التقينا بهما في الفصلين السادس عشر والتاسع عشر . وكانت القيمتان المقاستان لهذين الثابتين معروفة لدى ماكسويل .

سنفحص الآن خواص توزيع خاص للشحنات وهو ما يسمى ثنائي القطب الكهربي . وكما درسنا في الفصل السابع عشر ، فإن ثنائي القطب هذا يتكون من شحنتين متساويتين ومتعاكستين في الإشارة تفصلهما مسافة محددة ولتكن d . ويبين الشكل 1-22 طريقة بسيطة لخلق ثنائي قطب باستخدام بطارية حتى نشحن كرتين موصلتين صغيرتين متصلتين بطرفي البطارية المتعاكسين . وجانب من المجال الكهربي الأستاتيكي (الساكن) الذي يحدثه ثنائي القطب مبين في الشكل 1-22 . وشدة هذا المجال ـ بعيدًا بمسافة تزيد كثيرًا عن d ـ تتضاءل في تناسب عكسي مع مكعب المسافة إلى ثنائي القطب .



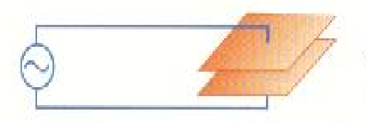
شكل 1-22:
جانب من المجال الكهربي اللحظي بالقرب من كرتين مشحونتين . وعندما تهتز الشحنات جيئة وذهابًا بين الكرتين فإن المجال الكهربي عند النقطة A يتغير اتجاهه بالتناوب إلى أعلى وإلى أسفل .

افترض الآن أننا قمنا بعكس قطبية البطارية بشكل مفاجئ . إن هذا كما نعلم سيجعل اتجاه المجال المبين في الشكل 1-22 ينعكس . ولنا أن نسأل هنا سؤالاً أساسيًا : « هل يمكن الإحساس بهذا التغير في المجال فورًا وفي كل مكان ؟ » . وبعبارة أخرى هل ستعاني شحنة اختبار موضوعة عند النقطة A من انعكاس القوة الكهربية ؟ ليس فيما درسناه حتى الآن ما يمكننا من الإجابة على هذا السؤال ، ولذا فلنُقْدِم على فحص ملاحظة أخرى .

عندما نعكس قطبية البطارية فإن الشحنة لابد وأن تسرى على طول ثنائي القطب خلال عملية عكس المجال الكهربي . وفي غضون هذا لابد أن يتكون مجال مغناطيسي بسبب التيار الذي خلفه سريان الشحنة . والسؤال الذي يثور الآن هو : « هل يمكن الإحساس بهذا المجال المغناطيسي على الفور عند النقطة A ؟ » .

على أن هناك سؤالاً آخر يثور تأسيسًا على هذه الملاحظة . عند عكس فولطية البطارية ، فإننا نحدث تغيرًا في المجال الكهربي . وهذا التغير يؤدي بدوره إلى خلق مجال مغناطيسي بسبب التيار الناشئ عن سريان الشحنة بين الكرتين . هل بإمكاننا

تعميم هذا التأثير ليشمل حالة لا يكون فيها سريان للشحنة في منطقة المجال الكهربي المتغير ؟ وبعبارة أخرى : « هل يستحث المجال الكهربي المتغير مجالات مغناطيسية وإن لم يكن هناك شحنات تسرى ؟ » .



شكل 2-22:
هل يخلق المجال E المتغير بين اللوحين مجالاً مغناطيسيا B ؟

وللإجابة على هذا السؤال سنعتبر مثال لوحى المكثف في الشكل 2-22 . عند تغيير قطبية اللوحين ، لا تسرى شحنات بينهما ، فالتيار سيسرى فقط في الدائرة الخارجية ، التي يمكن ترتيبها بحيث تكون الأسلاك التي توصل بين البطارية واللوحين وكذا الشحنات التي تحملها الأسلاك بعيدة تماماً عن الحيز المحصور بين اللوحين . وإذا ما وصلنا اللوحين بجهد مهتز ، فهل يستحث المجال الكهربي المتغير بين اللوحين مجالاً مغناطيسيًا بينهما حتى ولو لم تَسرْ شحنات بين اللوحين ؟ إن هذا المبدأ - أي فكرة إمكانية أن يستحث مجال مغناطيسي بواسطة مجال كهربي متغير - لم يكن معروفا في الوقت الذي كان ماكسويل يدرس فيه هذا السؤال .

لقد لاحظ ماكسويل أن قوانين الكهربية والمغناطيسية المعروفة تفتقر إلى التماثل بين المجالين E و B : فقد كان معروفاً أن مجالات B المتغيرة تستحث مجالات E ؛ ولم يكن هناك مقابل معروف لهذا القانون ، ويكون من شأنه التنبؤ بأن مجالات E المتغيرة لابد وأن تستحث مجالات B . وخطا ماكسويل الخطوة الجريئة بأن تبنى الفكرة الأخيرة . وقد افترض وجود تيار تصوري أسماه **التيار الإزاحي** I_D وهو يتناسب مع المعدل الزمني لتغير المجال الكهربي في منطقة ما . . وبتحديد أكبر ، قام ماكسويل بتعريف **الفيض الكهربي** ϕ_E خلال مساحة ما A بنفس الأسلوب الذي نعُرف به المجال المغناطيسي في المعادلة 1-20 : فبالنسبة للمجال E المنتظم عبر مساحة ما A :

$$\phi_E = E_\perp A$$

حيث $E_\perp$ هي مركبة $\mathbf{E}$ العمودية على المساحة A . ثم كتب ماكسويل التيار الإزاحي الذي اقترحه على الصورة :

$$I_D = \epsilon_0 \frac{\Delta \phi_E}{\Delta t} = \epsilon_0 A \frac{\Delta E_\perp}{\Delta t}$$

وبإمكانك التأكد من أن وحدات هذا التعبير هي الأمبير . ثم جاءت النقطة الحاسمة في فكرة ماكسويل الجديدة وهي أن المجالات المغناطيسية يمكن خلقها بواسطة **كل من** I_D والتيار الحقيقي I . ولذا فقد استعمل مجموع الحدين ليحصل على $I_{tot} = I_D + I$ ، في قانون أمبير بدلاً من استعمال I بمفرده .

وقد صاغ ماكسويل القوانين المعروفة بالإضافة إلى فرضه الجديد على هيئة صيغ رياضية تعرف بالمعادلات التفاضلية ، وعلى الرغم من أننا لا نستطيع طرح التفاصيل الرياضية ضمن هذا المقرر إلا أننا سنقدم عدداً من الملاحظات المهمة والشيقة بصورة وصفية .

ولما كانت معادلات ماكسويل تتضمن ما كان معروفاً بالفعل حول الكهربية والمغناطيسية فإنها احتوت الثابتين الفيزيائيين المعروفين ϵ_0 و μ_0 . وقد استطاع ماكسويل اشتقاق معادلات تعتمد على الزمن وتربط بين $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ وذلك بدمج معادلاته التفاضلية . ويمثل حل تلك المعادلات اهتزازات - جيبية (موجات) تعبر عن قيم شدة

المجالات . وتنبأت المعادلات ـ إلى جانب ذلك ـ أن هذه الاهتزازات ـ أو ما نطلق عليه الآن **الموجات الكهرومغناطيسية** ـ تنتقل خلال الفضاء الفارغ بسرعة موجية v تتحدد فقط بالثوابت الأساسية الواردة بالمعادلات :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

وحيث أن قيم هذه الثوابت كانت معروفة بالفعل فقد تمكن ماكسويل (وكذلك تستطيع أنت !) من حساب مقدار هذه السرعة :

$$v = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T.m/A})(8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2/N.m^2})}} = 2.998 \times 10^8\ \mathrm{m/s}$$

من المدهش أن هذا بالضبط هو مقدار سرعة الضوء c ! ولأول مرة فى التاريخ أمكن الربط بين الضوء المرئى (الذى يقع فى مجال دراسة البصريات) والكهربية والمغناطيسية . ويلاحظ أنه بما أن سرعة الضوء تتعين من ثابتين أساسيين ، **فلابد أنها هى الأخرى ثابت فيزيائى كونى** . ولم يؤد فرض ماكسويل حول المجالات المغناطيسية المستحثة إلى تفسير طبيعة موجات الضوء فحسب وإنما تنبأ بأن الموجات الكهرومغناطيسية يمكن أن تتخذ **أية** ترددات بما فيها ما هو فوق ترددات الضوء المرئى ($\approx 10^{15}$ Hz) وما هو تحتها وقد تمكن العالم الألمانى هاينرش هيرتز فى عام 1887 ، أو بعد موت ماكسويل بنحو عشر سنوات ، أن ينتج موجات كهرومغناطيسية ذات ترددات بالقرب من 10^8 Hz ، وهى الموجات التى نطلق عليها الآن **الموجات اللاسلكية** (موجات الراديو) . وقد قاس هيرتز الطول الموجى لموجاته تلك وحسب مقدار سرعتها فوجده مساويًا 3.2×10^8 m/s ؛ بدقة تكفى ـ باستعمال التجربة ـ لإثبات أن الضوء وموجات اللاسلكى ما هى إلا أمثلة على نفس نوعية الظواهر الموجية .

سنعود الآن إلى الأسئلة التى طرحناها فى بداية هذا القسم .

1 هل تنتقل تغيرات المجالين الكهربى والمغناطيسى إلى جميع النقط لحظيًا ؟ الإجابة هى **لا** . إن التغير فى أى من المجالين ينطلق من المصدر بسرعة مقدراها c ولذا فعند نقطة تقع على مسافة r من المصدر ، يكون الإحساس بهذا التغير فى زمن مقداره $t = r/c$.

2 هل يستحث مجال كهربى متغير مجالاً مغناطيسيًا حتى فى الفضاء الفارغ حيث لا تسرى أية شحنة ؟ **نعم** . فبدون هذا المبدأ ، لكانت قوانين الكهربية والمغناطيسية الأخرى ناقصة ولا يمكنها تفسير الموجات الكهرومغناطيسية . وقد ثبتت صحة فرض ماكسويل من حقيقة أن الموجات الكهرومغناطيسية موجودة ومن حقيقة أن خواصها المقاسة معمليًا تتفق مع تنبؤاته .

تنطوى كل أشكال الموجات التى درسناها من قبل كموجات الصوت والماء وموجات الأوتار على اهتزازات فى المادة التى تحمل تلك الموجات . وما لم تكن هناك مادة تهتز ، لما وجدت تلك الموجات . . مثلما يتضح ذلك من قرع جرس داخل غرفة مفرغة من الهواء . وبدون الهواء اللازم لحمل الذبذبات الصادرة عن الجرس فلن يصدر صوت ولا

تتمكن من سماع الجرس . أما فى حالة الموجات الكهرومغناطيسية التى تنتقل عبر فضاء فارغ ، فلن يحتاج الأمر إلى مادة تحمل تلك الموجات . إن المجال الكهربى E الذى يتغير جيبيًا يستحث مجالاً مغناطيسيًا B يتغير هو الآخر جيبيًا . ويستحث هذا المجال بدوره مجالاً كهربيًا E يتغير جيبيًا وهكذا . أى أن المجالين المهتزين يجدد كل منهما الآخر مع انتشار الطاقة الموجودة فى المجالين عبر الفضاء بسرعة مقدارها c . وكما هو الحال مع كل أنواع الموجات فإن تردد الموجة الكهرومغناطيسية يتحدد بتردد المصدر . وعندما يكون لدينا ثنائى قطب كهربى فالتردد هنا هو الخاص بالجهد المهتز المطبق . والطول الموجى للموجة الناتجة يكون من ثم هو :

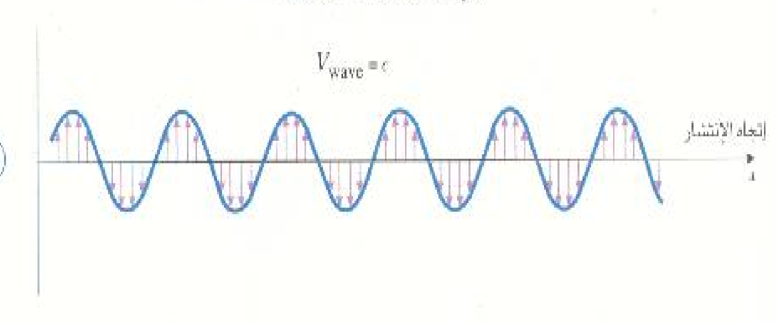
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f} \qquad (22\text{–}1)$$

وقد استقر لدينا حاليًا أن معادلات ماكسويل تعتبر أساسية ومهمة بالنسبة للكهرومغناطيسية مثلما تعتبر قوانين نيوتن بالنسبة للميكانيكا . ولذا تشكل معادلات ماكسويل الأساس لجميع الأعمال النظرية فى مجال الكهرومغناطيسية .

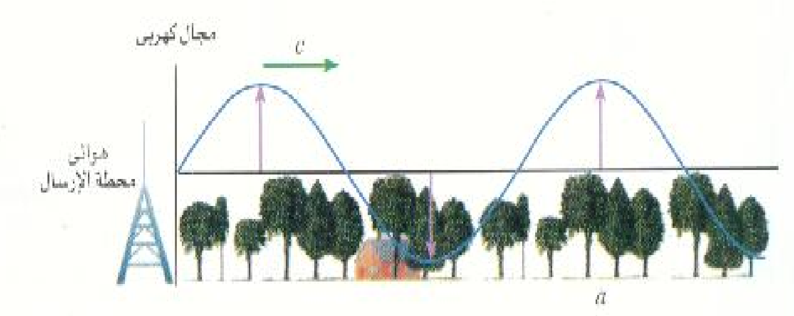
22-2 الموجات الكهرومغناطيسية الصادرة من هوائى ثنائى القطب

الآن وقد ناقشنا النتائج العامة لنظرية ماكسويل سنفحص عن قرب أكبر الموجات الكهرومغناطيسية التى يولدها جهد مهتز مطبق على ثنائى قطب كهربى . سنقوم أولاً بتوصيل مصدر جهد متردد التيار إلى قضيبين موصلين كما هو موضح على يسار الشكل 22-3 . ويقوم مصدر التيار المتردد بجعل الجهد المطبق يتغير جيبيًا بتردد مقداره f :

$$V_{\text{source}} = V_0 \sin 2\pi ft$$



شكل 3-22: تبعث الشحنات المترددة على هوائى ثنائى القطب اضطراب مجال كهربى بعيدًا عن الهوائى .



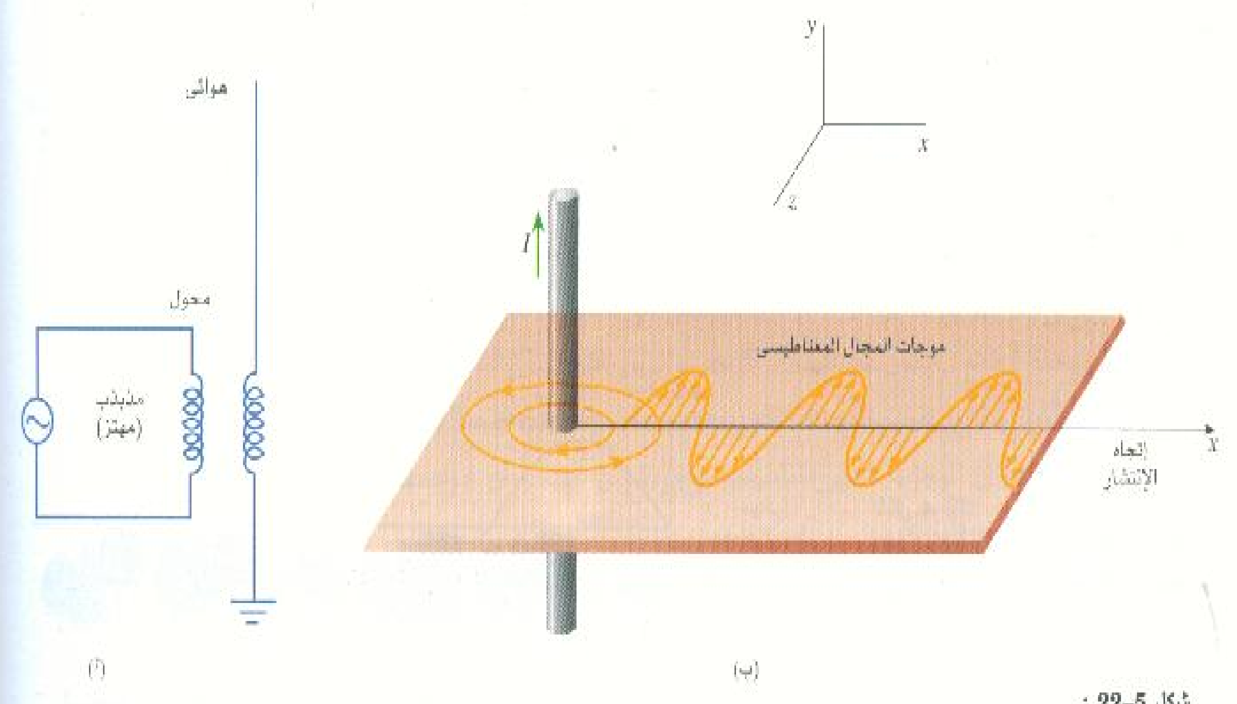
شكل 4-22: تغطى موجة المجال الكهربى التى يبثها الهوائى مساحة قد تكون بعيدة عن محطة الإرسال .

نستطيع أن ننظر إلى المجال الكهربى على أنه اضطراب يبعث به مصدر ثنائى قطب وذلك مثلما نعتبر الموجة التى تتكون على وتر على أنها اضطراب يدفع للانتقال عبر

الوتر بواسطة مصدر مهتز . ويمثل الشكل 3-22 المجال المنتشر عبر محور x فى لحظة معينة . إن المجال يبين تاريخ الشحنة على ثنائى القطب . لقد أطلقت المجالات المتجهة إلى أسفل عندما كانت قمة ثنائى القطب موجبة ، أما المجالات المتجهة إلى أعلى فقد أطلقت متأخرة نصف دورة ، عندما كانت قمة ثنائى القطب سالبة . وتنتقل هذه الموجة مبتعدة خارج ثنائى القطب بسرعة الضوء c .

وفى حالة محطة إذاعة فإن ثنائى القطب (الهوائى) غالبًا ما يكون مجرد سلك طويل . ولو أنك زرت محطة إرسال إذاعى لرأيت أن الهوائى عبارة عن سلك طويل - يمتد بين برجين مرتفعين أو سلك رأسى مثبت على برج واحد . وتنتشر الشحنات على الهوائى بواسطة جهد متردد التيار صادر من نظام محولات خاص . وتغطى موجة المجال الكهربى الذى يبثه الهوائى الأرض من حوله ، كما هو مبين فى الشكل 4-22 . وينعكس المجال دوريًا مع مرور الموجة عند نقطة مثل a على مسار الموجة . وتردد المجال الكهربى المهتز عند a هو نفس تردد المصدر . ونلاحظ إلى جانب ذلك ، أن المقدار الذى يتذبذب ، وهو متجه المجال الكهربى ، يكون متعامدًا دائمًا على اتجاه انتشار الموجة . وعلى ذلك تكون موجة المجال الكهربى موجة مستعرضة (القسم 11-14) .

ومن السهل ملاحظة أن هوائى محطة الإذاعة يولد بالضرورة موجة مجال مغناطيسى عندما يولد موجة مجال كهربائى ولبيان ذلك يُرجع إلى الشكل 5-22 ، حيث تتحرك الشحنات ، عند محطة الإذاعة إلى أعلى وإلى أسفل الهوائى المبين فى الشكل 5-22 (أ) لتنتج شحنات مترددة كما سبق وناقشنا . وتحدث هذه الشحنات المتحركة تيارًا مترددًا فى الهوائى ، وحيث أن هناك مجال مغناطيسى يحيط بالتيار فإن مجالاً مغناطيسيًا مهتزًا ينتج هو الآخر كما يبين الشكل 5-22 (ب) . ومثلما ينتشر المجال الكهربى المهتز

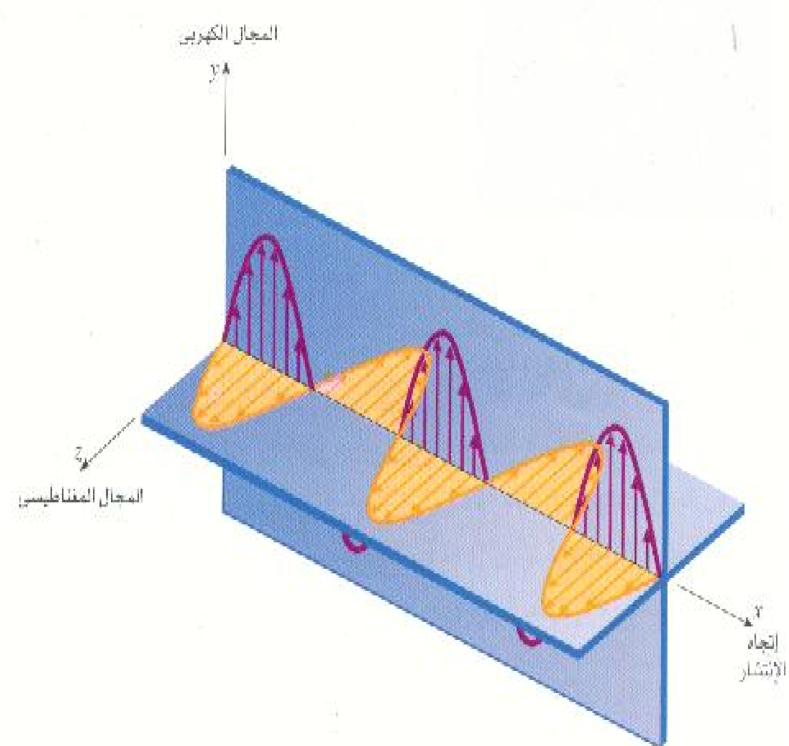


شكل 5-22 :
(أ) مع اندفاع الشحنة إلى أعلى وإلى أسفل الهوائى ، (ب) موجة المجال المغناطيسى تنتشر مبتعدة كما هو مبين .

فإن المجال المغناطيسي ينتقل هو الآخر عبر محور x على هيئة موجة مستعرضة . وبما أن اتجاه التيار يهتز ، فإن اتجاه المجال المغناطيسي هو الآخر يفعل نفس الشيء .

ويلاحظ من هذا ، أن المجال المغناطيسي يكون في اتجاه محور z ، بينما يكون المجال الكهربي في اتجاه المحور y . . وكما يتضح من الشكل 6-22 فإن المجال المغناطيسي متعامد مع كل من المجال الكهربي واتجاه انتشار الموجات . وقد رسمت الموجتان متوافقتين في الطَّور (أي أنهما تصلان إلى قمتيهما معًا) . وإن كان هذا ليس بالضرورة واضحًا عند مسافات تبعد عن الهوائي بالعديد من أطوال الموجات ، حيث أن الأمر يتطلب حسابات مفصلة .

ومن السمات الأخرى لتولد الموجات الكهرومغناطيسية التي لابد من التأكيد عليها أن الشحنات التي تهتز إلى أعلى وإلى أسفل الهوائي تكون في حالة تسارع . ومن المعروف أن الشحنات إذا تسارعت (تحركت بعجلة) فإنها تبعث بإشعاع كهرومغناطيسي وكلما زاد التسارع (أو التباطؤ) زاد انبعاث الإشعاع من الشحنات . ولهذا فلو تعرض جسيم يتحرك بسرعة لتصادم ما فإنه يطلق دفعة من الإشعاع الكهرومغناطيسي عندما يتوقف فجأة .



شكل 6-22:
تكون موجة المجال المغناطيسي متعامدة مع كل من المجال الكهربي واتجاه الانتشار .

مثال توضيحي 1-22

بدأ إرسال أول محطة إذاعة وهي المعروفة باسم (KDKA) في مدينة بتسبرج بالولايات المتحدة الأمريكية في عام 1920 وبهذا كانت أقدم محطة إذاعة وكانت تعمل عند تردد مقداره 1.02×10^6 Hz . ما هو الطول الموجي لموجة اللاسلكي التي تعمل عليها المحطة ؟ اعتبر سرعة الموجات المغناطيسية 3×10^8 m/s :

استدلال منطقى : نعلم أن $\lambda = v/f$ بالنسبة لأى موجة . وفى حالتنا هذه $v = 3 \times 10^8$ m/s و $f = 1.02 \times 10^6$ Hz . وبالتعويض نجد أن $\lambda = 294$ m .

تدريب : يبلغ الطول الموجى لموجات الرادار (الميكروئية) عدة سنتيمترات . ما هو تردد موجة كهرومغناطيسية طولها الموجى 20 cm ؟ **الإجابة :** 1.5×10^9 Hz .

22-3 أنواع الموجات الكهرومغناطيسية

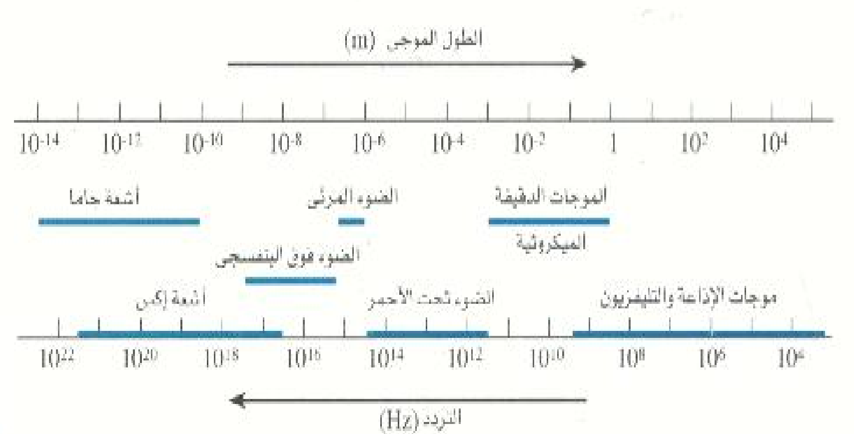

تستخدم الهوائيات التى على شكل أطباق كالموضح فى الصورة ، لاستقبال الموجات الكهرومغناطيسية التى تبث بأطوال موجية لاسلكية (راديو) من أجسام فى الفضاء .

يوجد بالإضافة إلى موجات الضوء المرئى والراديو ، مدى عريض من الأطوال الموجية (الترددات) للموجات الكهرومغناطيسية والتى قد اعتدنا عليها . ويسمى هذا المدى **طيف الموجات الكهرومغناطيسية** . وتنتج الأطوال الموجية المتنوعة بالعديد من الطرق سواء أكانت طبيعية أم هندسية . كما أن هناك عددًا من الأجهزة المختلفة والتقنيات التى تستخدم للكشف عن الموجات الكهرومغناطيسية الواقعة فى أجزاء متفرقة من الطيف .

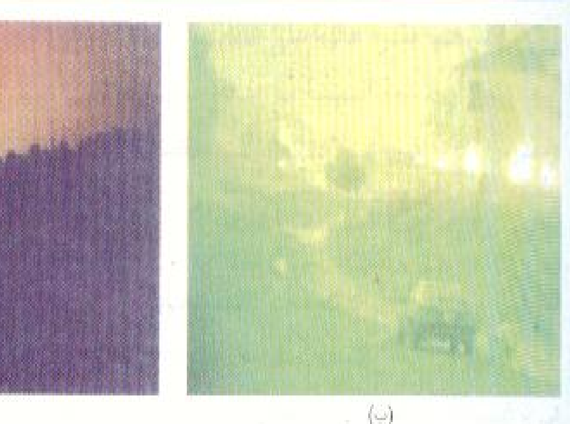
يوضح الشكل 7-22 الطيف الكهرومغناطيسى . وقد وجد أنه من المناسب تقسيم الطيف إلى فئات الموجات المبينة ، على الرغم من أن التقسيم اختيارى وقد تتراكب الفئات فيما بينها . ويلاحظ أن الأطوال الموجية تزداد فى اتجاه اليمين بينما تزداد الترددات فى اتجاه اليسار . وبالنسبة لجميع الموجات فإن $c = f\lambda$. ويلاحظ أيضًا أن الطيف يغطى مدى هائلاً من القيم يصل إلى 20 من قوى (أسس) العدد 10 . وسنناقش كل فئة بإيجاز .

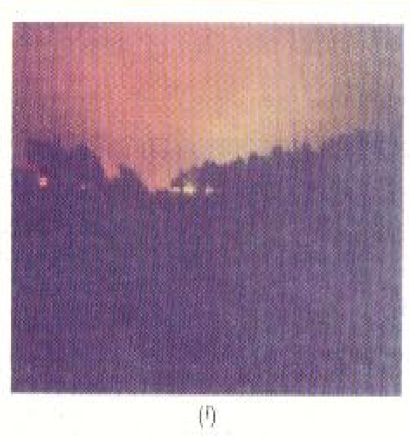
موجات اللاسلكى (أو الراديو)

تتكون منطقة الموجات اللاسلكية من الطيف من كل الأطوال الموجية التى يزيد طولها عن 1 m تقريبًا . ويلاحظ أن مدى الترددات المناظر يرتفع إلى نحو 10^9 Hz . وتستخدم أجهزة FM المدى الواقع بين $f = 88$ MHz و $f = 108$ MHz ، كما هو موضح وتستطيع رؤيته على جهاز الراديو الخاص بك . أما جهاز AM فيغطى المدى من $f = 500$ kHz



شكل 7-22:
أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسى ، وتبين القضبان المدى التقريبى للأطوال الموجية فى كل نوع من أنواع الإشعاع .


(ب)


(أ)

تستمر الأجسام الساخنة فى إطلاق الموجات تحت الحمراء حتى أثناء الليل عندما يؤدى اختفاء الضوء المرئى إلى جعل الدنيا ظلامًا . وتمثل هاتان الصورتان نفس المنظر الذى التقط فى نفس الوقت . الصورة (أ) التقطت على فيلم حساس للضوء المرئى . بينما تمثل الصورة (ب) الجزء الأوسط من (أ) مكبرًا بعد أن يتم التقاطه بجهاز الرؤية الليلية الحساس للأشعة تحت الحمراء . وزمن التعرض للضوء فى الصورتين هو 1/4 ثانية .

إلى 1600 kHz . ويحتل الإرسال التليفزيونى أشرطة الترددات الواقعة على جانبى منطقة FM . ويخضع تحديد مناطق الترددات المختلفة الخاصة بالأغراض المتنوعة لتنظيمات فيدرالية وذلك منعًا لأى لبس مزعج .

الموجات الدقيقة (الميكروئية)

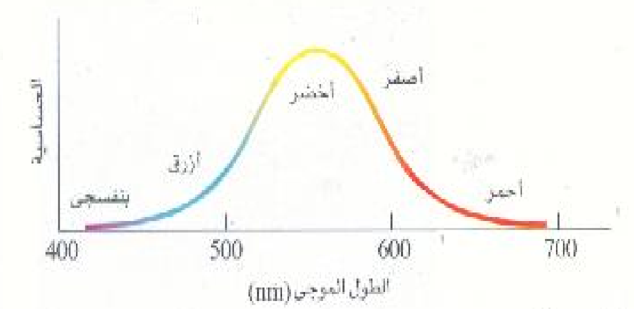
هذه الموجات ـ كما يدل اسمها ـ هى موجات لاسلكية (راديو) قصيرة للغاية ، وتضم هذه الفئة الرادار وأفران الميكروويف وأجهزة الاتصالات المستخدمة فى نقل المكالمات التليفونية لمسافات بعيدة .

الموجات تحت الحمراء

يمتد مدى الموجات تحت الحمراء من الطرف ذى الموجات ذات الطول الموجى القصير فى منطقة الموجات الميكروئية (الأشعة تحت الحمراء البعيدة) إلى الحافة الحمراء للضوء المرئى (الأشعة تحت الحمراء القريبة) . وعادة ما نعبر عن الأطوال الموجية لهذه الموجات بوحدات الميكرون (μ) ($1\mu = 1\mu m = 10^{-6}$ m) . وتنبعث إشعاعات الموجات تحت الحمراء من كل الأجسام الدافئة والحارة . كما أن هذه الموجات تمتص بشدة فى العديد من الجزيئات بما فى ذلك الماء وثانى أكسيد الكربون وعند امتصاصها ، تتحول طاقة الموجة إلى طاقة حرارية تؤدى إلى تسخين الجسم الماص . ولهذا السبب كثيرًا ما يطلق الاسم الخاطئ « الإشعاع الحرارى » على الأشعة تحت الحمراء .

الضوء المرئى

هناك جزء من الطيف الكهرومغناطيسى بمقدور العين البشرية أن تحس به . . وهو ما يعرف بالضوء . وهو يحتل مدى صغيرًا للغاية من أطوال الموجات يقع بين 400 و 700 nm . وندرك بأبصارنا ما نسميه « الألوان » داخل إطار هذا المدى . . وتتراوح هذه الألوان بين البنفسجى مرورًا بالأزرق فالأصفر فالبرتقالى ثم الأحمر . ويبين الشكل 8–22 كيفية تغير حساسية العين البشرية مع الطول الموجى ؛ حيث تصل قمة الحساسية عند نحو 550 nm . إن الإلكترونات التى تمر بتغيرات فى الطاقة داخل الذرات هى التى تقوم بدور الهوائى الذى يصدر الضوء .



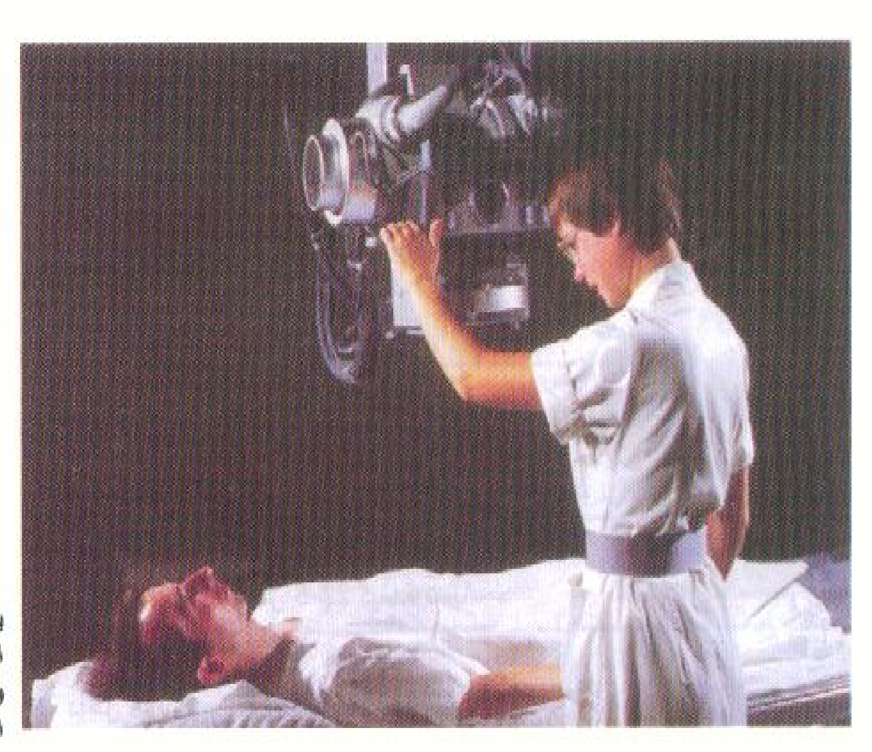
شكل 8-22:
منحنى حساسية العين البشرية . حيث يلاحظ أن الحساسية أقصى ما تكون للضوء الأصفر المائل للاخضرار .

الموجات فوق البنفسجية

تقع منطقة تسمى بفوق البنفسجية من الطيف فيما بعد حد الأطوال الموجية القصيرة (البنفسجي) لحساسية العين البشرية . ويمكن استخدام نوع من مصادر الضوء فوق البنفسجي (يعرف « بالضوء الأسود ») في إضاءة شاشات تحتوى على دهان فلورى : إذ يمتص الدهان الموجات فوق البنفسجية غير المرئية ثم يشع جزءًا من الطاقة على هيئة موجات تقع فى منطقة الطيف المرئى . **والأشعة فوق البنفسجية القريبة** تمتص بشدة فى حزام الأوزون الموجود فى جو الأرض . أما **الأشعة فوق البنفسجية البعيدة** ، حيث تقترب من $\lambda = 10$ nm فتتراكب مع طيف أشعة إكس (أو الأشعة السينية) . وتعتبر الأنواع الشائعة من الزجاج معتمة بالنسبة لمعظم طيف الأشعة فوق البنفسجية .

أشعة إكس (أو الأشعة السينية)

عندما يقذف تيار - ذو طاقة عالية - من الإلكترونات نحو لوح معدنى داخل أنبوبة مفرغة فإن هذا يشكل طريقة من طرق توليد أشعة إكس . والأطوال الموجية النموذجية لهذه الموجات لها نفس حجم أو حتى أقل من قطر ذرة منفردة ؛ أو نحو 0.1 nm .



يعتبر استعمال أشعة إكس فى التشخيص الطبى من أكثر تطبيقاتها شيوعًا . . ويستخدم لهذا الغرض جهاز كالمبين فى الصورة .

وأشعة إكس لها مقدرة عالية على النفاذ من المواد الرخوة كاللحم . ويتراكب معظم طيف أشعة إكس أو الأشعة السينية مع أشعة جاما ويختلف الاثنان فى أسلوب تولدهما . وسندرس أشعة إكس أو الأشعة السينية بتفصيل أكبر فى الفصل السابع والعشرين .

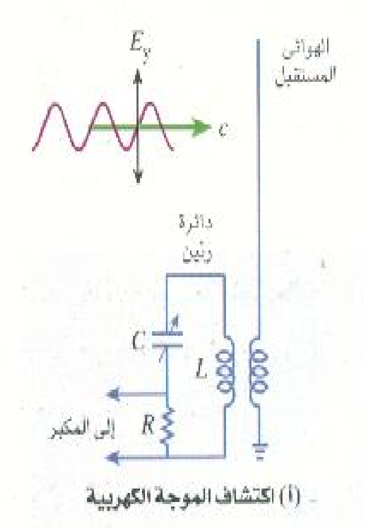
أشعة جاما

لهذه الأشعة أقصر أطوال الموجات الكهرومغناطيسية على الإطلاق . فهى تشمل موجات يصل طولها إلى أبعاد تقارب نصف قطر **نواة** الذرة أو 10^{-15} m وتعتبر التغيرات التلقائية فى تركيب أنوية معينة (النشاط الإشعاعى) والأشعة الكونية القادمة من الفضاء الخارجى من أهم مصادر أشعة جاما ، ونقدم فى الفصل الثامن والعشرين دراسة وافية لأشعة جاما .

يلاحظ أن الطيف الكهرومغناطيسى يمتد ليغطى موجات تتراوح أطوالها بين ما يزيد على 10^{6} m وما هو أقل من 10^{-15} m . وعلى الرغم من أن كل هذه الموجات كهرومغناطيسية إلا أنها تختلف من حيث تفاعلها مع المادة . وسيخصص ما تبقى من الكتاب لدراسة الجوانب المتنوعة لهذا الموضوع .

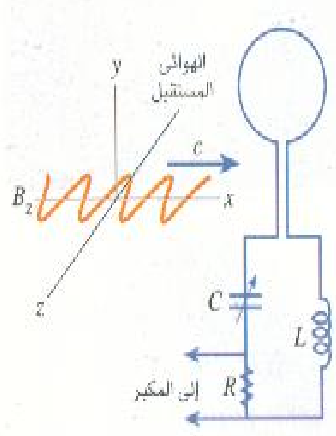
22-4 استقبال موجات اللاسلكى (أو الراديو)

صممت أجهزة التليفزيون والراديو بحيث تكون أجهزة حساسة لالتقاط الموجات الكهرومغناطيسية فى مدى الموجات اللاسلكية ـ موجات الراديو ـ . وعلى الرغم من أننا لن نناقش تركيب هذه الأجهزة بالتفصيل إلا أننا سنتعرف على الكيفية التى تلتقط بها الموجات اللاسلكية وتتناغم معها .



(أ) اكتشاف الموجة الكهربية

والموجة الكهرومغناطيسية يمكن الكشف عنها والتقاطها إما بواسطة جزئها الكهربى أو المغناطيسى . ولكى نلتقط الجزء الخاص بالمجال الكهربى فلا نحتاج سوى لقطعة طويلة من السلك (تسمى **هوائى الاستقبال**) فى مسار تلك الموجات وإذا رجعنا إلى الشكل 9-22 (أ) فسنرى أن المجال الكهربى يجعل الشحنات تهتز فى الهوائى . وعندما يكون $\mathbf{E}_y$ موجبًا ، فإن قمة الهوائى تكون موجبة . ثم تنعكس قطبيه الهوائى فى اللحظة التالية مباشرة ، عندما ينعكس اتجاه متجه المجال الكهربى فى الموجة . ويجعل هذا التأثير المتكرر الشحنة تسرى إلى أعلى وإلى أسفل الهوائى بصورة تعتمد جيبيًا على الزمن . وخلال هذه العملية ، يستحث التيار المتغير جهدًا مهتزًا فى دائرة RLC مرتبطة بالهوائى بواسطة محاثة متبادلة . فإذا ضبطت الدائرة RLC بشكل صحيح فإن الدائرة ترن مع تردد موجة الراديو القادمة إليها . وسنقوم بإيضاح هذه النقطة .



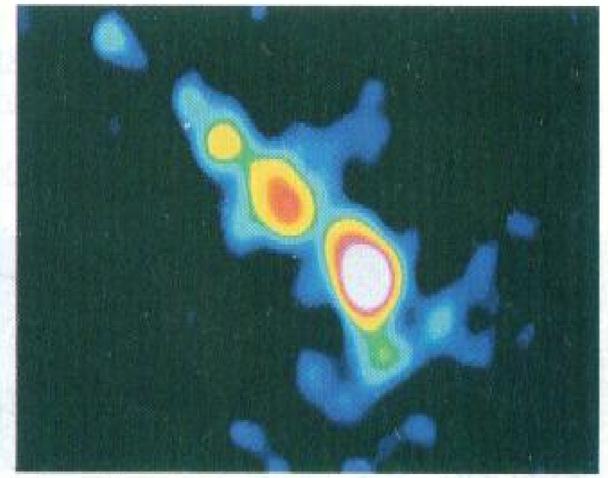
(ب) اكتشاف الموجة المغناطيسية

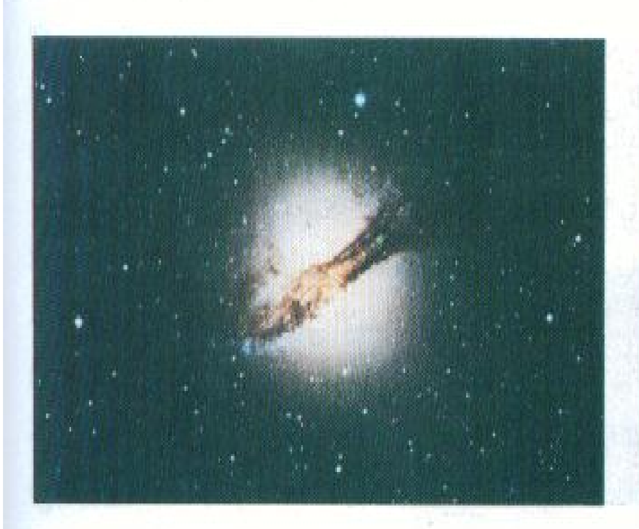
شكل 9-22:
يمثل الشكل طريقتين لاكتشاف موجات الراديو : (أ) اكتشاف الموجة الكهربية ، (ب) اكتشاف الموجة المغناطيسية .

إن لكل محطة إذاعة أو تليفزيون التردد المخصص لها ، حيث تقوم ببث الموجات عند ذلك التردد فقط . وبما أن الموجات القادمة من العديد من المحطات تسقط فى نفس الوقت على الهوائى ، فإنه لابد من وجود وسيلة تستخدم لالتقاط الموجة الصادرة من المحطة المطلوبة فقط . وإذا رجعت إلى الشكل 9-22 لوجدت أن المكثف قد رسم سهم خلاله مشيرًا بذلك إلى أن هذا المكثف متغير السعة وعلينا تذكر أن دائرة LRC المتصلة

على التوالى تتميز بوجود تردد رنينى f_r يعتمد على كل من L و C : $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$ وعند تغيير C فإن التردد الذى يحدث عنده الرنين يتغير . وتسمى عملية تغيير C **ضبط** أو**موالفة** الدائرة . فإذا تصادف أن f_r الخاصة بالدائرة تتطابق مع تردد الموجة القادمة فإن تيارًا مترددًا ذا قيمة قصوى i سيحدث فى الدائرة ، متسببًا بهذا فى جهد متردد ضخم iR عبر المقاوم R . ويصبح هذا الجهد المتردد هو الإشارة الداخلة إلى جهاز استقبال الراديو حيث يتم تكبيره بواسطة مراحل أخرى داخل جهاز الاستقبال . وعندما يكون الرنين « حادًا » (أى أن تيار الرنين يتميز بقمة ضيقة جدًا فى العلاقة بين التيار والتردد) . فإن اختيار إحدى محطات الإذاعة عن طريق موالفة الدائرة على تردد تلك المحطة يجعل الجهاز يتجاهل كل الترددات البعيدة عن الرنين والتى تصل إلى الهوائى .

ويمكن اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية أيضًا بواسطة مجالها المغناطيسى المتذبذب ، فحيث أن هذا المجال يتغير بسرعة فإن الموجة تستحث ق.د.ك. فى عروة كالمبينة فى الشكل 9-22 (ب)* . ويلاحظ أنه لابد من توجيه العروة بشكل صحيح بحيث يمر فيض المجال المغناطيسى من خلالها (ولهذا السبب نجد أن أجهزة الراديو الصغيرة يختلف استقبالها لمحطات الإذاعة تبعًا لاتجاهها) . ويصل الجهد المستحث فى عروة الهوائى إلى دائرة RLC حيث يطبق عليها . وتتم الموالفة أو الضبط بالطريقة الموصوفة آنفًا .





منظر للمجرة NGC 5128 كما نرى من خلال (أ) انبعاثات الضوء المرئى و (ب) انبعاثات أشعة إكس . لاحظ أن نفثات المادة التى يبينها تلسكوب أشعة إكس مختفية تمامًا فى الصورة الملتقطة للأشعة الضوئية المرئية . ويوضح هذا أن الفلكيين لابد وأن يفحصوا كل جزء من طيف الموجات الكهرومغناطيسية حتى يمكنهم الحصول على أقصى قدر من المعلومات حول كوننا .

وقد يتساءل شخص ما ، لماذا لا يتم اكتشاف كل الموجات بما فى ذلك الضوء وأشعة إكس بأجهزة على غرار الراديو . والإجابة غاية فى البساطة أن الموجات ذات الترددات العالية جدًا تتطلب دوائر RLC رنينية يستحيل بناؤها تمامًا . فتردد الرنين ـ كما نعلم ـ لدائرة ما هو $1/2\pi\sqrt{LC}$. ولكى نجعل هذا التردد عاليًا جدًا لابد من أن يكون كل من L و C صغيرًا جدًا . أما فى حالة الموجات تحت الحمراء والموجات الضوئية وأشعة إكس ، فإن مجرد وضع سلكين جنبًا إلى جنب يجلب قيمًا للسعة C والمحاثة L كبيرة جدًا . وسوف نرى فى فصول قادمة أنه تلزم دائرة ذات أحجام ذرية لاكتشاف هذه

* تلتف العروة ـ عمليًا ـ على قضيب من مادة فرومغناطيسية مكونة ملفًا .

الموجات . وسوف نكتشف أن الذرات والجزيئات المنفردة تصبح فعليًا هي الدوائر الرنينية المستخدمة في اكتشاف موجات كهرومغناطيسية ذات ترددات مرتفعة جدًا .

22-5 سرعة الموجات الكهرومغناطيسية

الآن ، وقد استوعبنا الكثير من الصفات النوعية للموجات الكهرومغناطيسية ، فقد جاء الدور على الإتيان بتعبير رياضي لتحديد سرعتها . وسوف نستخدم طريقة تعتمد على حقيقة أشار إليها أينشتين بوضوح لأول مرة في نظريته للنسبية ، وهي حقيقة سنتناولها بالدراسة المفصلة في الفصل السادس والعشرين : **السرعات النسبية فقط هي التي يمكن تعيينها** . فيقال لجسم ما أنه ساكن بالنسبة لجسم آخر ولكنه لا يكون ساكنًا بأي معنى مطلق آخر .

فحين تقرأ هذا الكلام ، مثلاً ، فقد تكون ساكنًا بالنسبة للأرض ، ولكن الأرض نفسها في حركة بالنسبة للشمس وبالتالي فأنت أيضًا كذلك . وبالإضافة إلى هذا فالشمس في حركة داخل مجرتنا ، درب التبانة (أو الطريق اللبنية) ، ومجرتنا في حركة بالنسبة للمجرات الأخرى السابحة في الكون . وقولنا أن شيئًا ما في حالة سكون بالنسبة لشيء آخر قد يكون ذا معنى ولكننا لا نستطيع القول عن أي الجسمين في حالة سكون مطلق أو بأية طريقة لا تشتمل على مقارنة .

دعنا الآن نناقش القوة التي تتعرض لها شحنة q تتحرك بسرعة مقدارها v في اتجاه متعامد مع مجال مغناطيسي مقداره $B_\perp$ وذلك في إطار الحقيقة السابقة . لقد وجدنا في الفصل التاسع عشر أن القوة التي تتعرض لها الشحنة هي :

$$F = qv\,B_\perp$$

ولكن من الذي يستطيع القول بأن الشحنة ليست ساكنة وأن المجال - بدلاً منها - هو الذي يتحرك ؟ فالواقع أننا لا نلاحظ في النهاية إلا الحركة النسبية . ومن ثم فتجربتنا قد تفسر بطريقة بديلة على النحو التالي : إن مجالاً **B** يتحرك بسرعة v عموديًا على خطوط المجال مرورًا بشحنة مقدارها q سيؤثر عليها بقوة مقدارها $F = qv\,B_\perp$.



الفيزيائيون يعملون : بول هوروفيتس جامعة هارفارد

لقد شغلت تمامًا خلال العقد الأخير بمسالة البحث عن ذكاء خارج نطاق الكرة الأرضية وذلك بالتنصت بواسطة تلسكوب لاسلكي جبار متصل بطبق مزود بأكثر معدات التنصت تعقيدًا لالتقاط أية إشارات لاسلكية صادرة عن حضارات متقدمة ، وعلى الرغم من أن هذا النوع من النشاط كان يعد في وقت سابق شيئًا « غير علمي » إلا أن الاكتشافات الحديثة في مجال علم الفلك والمجالات المرتبطة به تؤيد فكرة وجود العديد من الكيانات التي تضم صورة من صور الحياة . وتشير بيانات الأشعة تحت

الحمراء والمرئية على وجه الخصوص ـ للأقراص الكوكبية ، إلى وجود نظم كوكبية عادية فى كوننا ، كما تشير إلى ذلك أيضاً الأدلة غير المباشرة على وجود أجرام كوكبية تسمى الأقزام البنية . وقد وجدت فى نفس الوقت مكونات الحياة فى النيازك وسحب ما بين النجوم الغازية الباردة وكذا فى البقايا المتخلفة من خلال التجارب المعملية التى تتعرض فيها مكونات التربة البدائية للحرارة وضوء الشمس والتفريغ الكهربى . وعلى هذا فلدينا كميات كبيرة من المادة الخام والبيئات الصالحة للحياة . ولسنا نحن البشر إلا لمحة ضئيلة من الحياة على كوكب متوسط تقريبًا ، يدور حول نجم متوسط ، وهو واحد من 400 بليون نجم فى مجرتنا ، التى هى واحدة من مائة بليون مجرة فى الكون . وفى ضوء هذا قد يكون من الوقاحة أن نظن أن الحياة لا توجد إلا فوق الأرض .

إن أقرب نجم إلينا يقع على بعد أربعة ملايين سنة ضوئية ، أما مجرتنا فتمتد إلى نحو مائة ألف سنة ضوئية . هل الاتصال بحضارات أخرى يكون ممكنًا حتى فى ظل هذه المسافات التى تجعل العقل ينكمش ويجفل ؟ إن الإجابة المذهلة هى نعم فباستخدام تكنولوجيا الموجات اللاسلكية الدقيقة (الميكروويف) فى علم الفلك ، المتاحة حاليًا ، يمكن للأرض أن تتصل بكوكب شقيق لها فى أى بقعة من مجرتنا وهذا بالطبع أمر مناقض تمامًا للجهود المطلوبة للانتقال إلى نظام نجمى آخر حيث يتطلب الأمر استهلاك موارد الطاقة المتاحة بالأرض لمئات السنين لمجرد إجراء رحلة إلى أقرب نجم ثم العودة منه .

إذن ، إذا كانت هناك حياة متقدمة علينا وتوجد فى نجوم أخرى فلماذا لم نسمع شيئًا منهم إذا كانت وسائل الاتصال ممكنة ؟ يحتمل أننا لم ننظر فى الحقيقة إلى الأمر كما يجب . فقد كانت هناك بحوث متناثرة فى مجالات شتى ولا يكاد تمويلها يسد الرمق : لقد نحينا جانبًا إمكانية أن السماء مليئة بنفايات على هيئة أجهزة إرسال توجه أشعة قوية فى طريقنا . ولكى نؤدى العمل على الوجه الأكمل نحو مسح دقيق للسماوات بحثًا عن إرسال متعمد من « فنار » لاسلكى يكون خافتًا للغاية لدى وصوله إلينا ، لابد لنا من معدات لمعالجة الإشارات وهى معدات معقدة لم تأخذ فى الظهور إلا مؤخرًا بفضل ثورة السليكون . وقد بدأت البحث نظم للاستقبال بها ملايين القنوات فى معملنا فى هارفارد وفى أماكن أخرى فى العالم ، ويتوقع الكثيرون منا أن تنجح هذه الجهود خلال قرن من الزمان .

وسيكون اكتشاف إشارات من حضارة أخرى هو بمثابة نهاية العزلة الثقافية لكوكب الأرض إذا شئنا التعبير بعمق ؛ بل إن هذا الحدث سيكون هو الأكبر فى تاريخ البشرية . إن مجرد اكتشاف مثل هذه الإشارة سيجيب على السؤال المهم : « هل نحن وحدنا ؟ » أما المعلومات التى ستتدفق عبر الفنار الذى يعمل بين النجوم بمثابة « إنسيكلوبيديا جلاكتيكا » أو دائرة معارف مجرية ، تحتوى على علوم وفنون وتاريخ وآداب خارج نطاق أقصى أمانينا تطرفًا . إن معداتنا هى الجيل الأول الذى يقدر على عمل الاتصال بشكل واقعى . ولا أستطيع تخيل استكشافات أكثر إثارة مما نفعله ولذا أكرس كل طاقتى فى أداء هذه التجارب .

ولقد أحببت دائمًا ، منذ ذكرياتى المبكرة ، اللعب بالأدوات المختلفة مترسمًا خطى أخى الأكبر . وكان أغلب ما يشدنا هو الإلكترونيات ، ثم أصبحنا من جيل الصواريخ الصغير فى عصر « سبوتنيك » . وقد درس أخى الهندسة الكهربائية فى معهد MIT (ويمتلك الآن شركة للاتصالات بالتكنولوجيا المتقدمة) ، وإن كان قد نصحنى باختيار الفيزياء كتخصص رئيسى بدلاً من تخصصه هو ، لأن الفيزياء موضوع كونى . وقد أضاف والداى أنه على أن أدرس فى هارفارد ؛ حيث توجهت وحيث استقر بى المقام . وقد كانت دراسة العلوم التجريبية فى جامعى أكاديمية شيئًا بديعًا للغاية حيث أتيح لنا أن نفعل ما يعن لنا إلى درجة إجراء تجارب تكاد تكون معتوهة . ولعلى أصنف كمعتوه أو غريب الأطوار نظرًا لقيامى بمجموعة من التجارب التى يضمها خيط واحد وهى أنها بعيدة عن المسار الدراسى ، مثل البحث : عن زلازل فوق النجوم النابضة وفى أنواع مبتكرة من الميكروسكوبات (المجاهر) التى تعمل بأشعة إكس وبالبروتونات وفى تركيب الآلات الدورانية البكتيرية فى إشيريشيا كولاى (نوع من البكتيريا) والبحث عن ذرات فائقة الوزن ، وبالطبع عن الهدف العلمى الرئيسى وهو البحث عن ذكاء خارج نطاق الكرة الأرضية (SETI) .

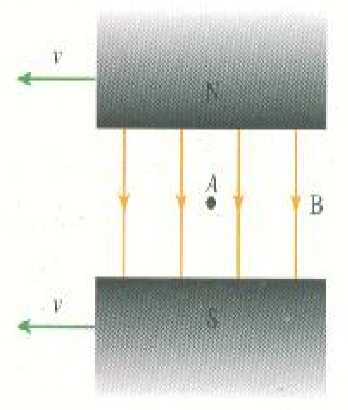
إننى أستمتع بإجراء تجارب تتطلب قدرًا كبيرًا من بناء أجهزة إلكترونية حسب طلبى ، لأننى أحب دائمًا أن أبنى أشياء . وإن كنت أجد أن مجتمع الفيزيائيين مثير للغاية وسعيد جدًا لأننى اتبعت نصيحة أخى . وعندما أقوم بعمل هندسى فإننى أجد نفسى « أفكر كفيزيائى » . وقد لا يبدو غريبًا ، حقيقة أن أفضل مصممى الدوائر الإلكترونية هم الفيزيائيون « الفاشلون » ! ولا أتردد فى إسداء النصيحة التالية : إذا لم تكن متأكدًا مما تريد كخط لبناء مستقبلك وظننت أن الأمور قد ترسو على الفيزياء فتخصص فى الفيزياء . إنها ستكون أعظم إعداد لك لكى تقوم بعمل أشياء أخرى غير الفيزياء .

وبما أن القوة المؤثرة على وحدة الشحنات F/q تعرّف على أنها مقدار المجال الكهربى ، فيمكننا أن نعيد صياغة هذا على النحو التالى :

عندما يتحرك مجال مغناطيسى B بسرعة مقدارها v عموديًا على خطوط المجال فإنه يولد مجالاً كهربيًا مقداره :

$$E = vB \qquad (22\text{-}2)$$

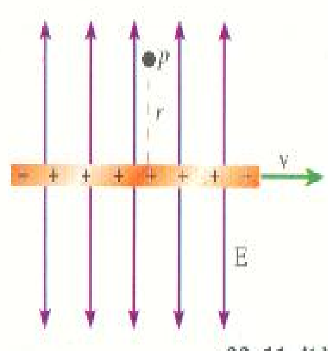
فى المنطقة التى يخترقها .



شكل 10-22:
يتحرك المجال المغناطيسى B (المبين بالخطوط الملونة الرأسية) مع قطبى المغناطيس عبر النقطة A بسرعة مقدارها v وتولد هذه الحركة مجالاً كهربيًا $E = Bv$ يتجه إلى داخل الصفحة .

ولكى نوضح هذا دعنا ندرس الحالة المبينة فى الشكل 10-22 ، حيث يتحرك قطبا المغناطيس بسرعة مقدارها v فى الاتجاه المبين . وهما بذلك يحملان معهما خطوط المجال المغناطيسى ، أى أن لدينا فى هذه المنطقة مجالاً مغناطيسيًا متحركًا هو B ، ومن ثم سيوجد فى منطقة مثل A مجال كهربى مقداره $E = vB$. ولابد أن تستطيع إثبات أن اتجاه E يكون إلى داخل الصفحة* .

ويبدو من مسيرة هذا الاستدلال المنطقى أن المجال المغناطيسى المنطلق من هوائى جهاز إرسال لاسلكى لابد أن يولد مجالاً كهربيًا فى المنطقة التى يخترقها . وأنه عند نقطة معينة ، لابد للمجال الكهربى أن يرتبط بسرعة تحرك موجة المجال المغناطيسى ومقدار ذلك المجال بالعلاقة $E = vB$ وهنا يثور السؤال عما إذا كان **المجال الكهربى** المتحرك ، قادرًا على توليد **مجال مغناطيسى** أم لا . إن الإجابة عن هذا السؤال ستفضى بنا إلى نتيجة مهمة للغاية .



شكل 11-22:
يحمل السلك المشحون المتحرك خطوط المجال الكهربى معه عبر النقطة P .

افترض أن لديك سلكًا طويلاً منتظم الشحنة كما هو مبين فى الشكل 11-22 . وأن السلك يتحرك نحو اليمين فى اتجاه طوله بسرعة مقدارها v ، هى نفس سرعة خطوط المجال الكهربى الصادر عنه والتى تتحرك عبر نقطة P . ونعلم أن السلك المشحون المتحرك يشكل تيارًا بطول السلك ، يتعين مقداره إذا علمنا كمية الشحنة التى تمر عبر P فى الثانية الواحدة . فإذا فرضنا أن بالسلك شحنة مقدارها ρ فى وحدة أطواله (لقد استخدمنا ρ للتعبير عن الكثافة الخطية للشحنة بدلاً من λ التى استخدمناها فى الفصل السادس عشر حتى نتجنب اللبس مع الرمز λ المستخدم للدلالة على الطول الموجى) . وأن طول السلك الذى يمر بالنقطة P فى زمن قدره t هو vt ، فإن

* تلميح : ضع شحنة موجبة عند النقطة A وتذكر أن الحركة نسبية .

$$\text{التيار} = \frac{\text{الشحنة المارة بالنقطة } P}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{\rho vt}{t} = \rho v$$

أى أن مقدار التيار الذى يشكله السلك المشحون المتحرك هو ρv .

على أن التيار ينتج مجالاً مغناطيسيًا ، لذلك فالسلك المتحرك يكون محاطًا بمجال مغناطيسى (عليك إثبات أن هذا المجال يحيط بالسلك ويتجه إلى خارج الصفحة فى المنطقة الواقعة فوق السلك) . وقد درسنا فى الفصل التاسع عشر أن المجال المغناطيسى الذى ينشؤه تيار I يمر فى سلك طويل مستقيم هو $B = \mu_0 I/2\pi r$ (المعادلة 9-19) . فإذا طبقنا هذه النتيجة على الحالة الراهنة ، لوجدنا أن المجال المغناطيسى عند النقطة P هو

$$B = \frac{\mu_0 \rho v}{2\pi r} \qquad (22\text{–}3)$$

ونأمل الآن فى ربط هذه النتيجة بالمجال الكهربى خارج السلك عند النقطة P .

نعلم من المعادلة (7-16) أن المجال الكهربى خارج سلك مستقيم ، طويل منتظم الشحنة هو

$$E = \frac{\rho}{2\pi \epsilon_0 r} \qquad (22\text{–}4)$$

حيث ϵ_0 هى سماحية الفراغ ومقدارها $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N.m^2$. سنلغى الآن ρ من المعادلتين (3-22) و (4-22) والنتيجة هى :

$$B = \epsilon_0 \mu_0 v E \qquad (22\text{–}5)$$

ويمكن مقارنة هذه المعادلة بالعلاقة السابقة :

$$B = \frac{E}{v} \qquad (22\text{–}6)$$

التى حصلنا عليها من قبل بالنسبة لمجال مغناطيسى متحرك .

وعلى الرغم من أن هذه تعتبر حالة خاصة جدًا حيث يتحرك سلك مشحون بحيث يولد مجالاً مغناطيسيًا ، إلا أنها حالة نموذجية . إن الشحنات المتحركة تولد مجالاً مغناطيسيًا ، ولكن الشحنات المتحركة تكون مصحوبة بمجال كهربى يتحرك معها دائمًا . والمجال المغناطيسى الذى تولده حركة الشحنات يمكن أن يعزى أيضًا إلى حركة المجال الكهربى وعلى هذا نستطيع أن نخرج بالنتيجة التالية :

المجال الكهربى $\mathbf{E}$ المتحرك بسرعة مقدارها v عموديًا على خطوط المجال ، يولد مجالاً مغناطيسيًا مقداره $B = \epsilon_0 \mu_0 v E$ فى المنطقة التى يخترقها .

لنعد الآن إلى الشكل 6-22 الذى يظهر فيه مجال مغناطيسى وآخر كهربى متولدين بواسطة هوائى . يندفع المجالان بامتداد خط الانتشار بسرعة مقدارها v ولنأخذ أولاً المجال المغناطيسى وهو يمر عبر نقطة ما فى الفضاء إنه يولد مجالاً كهربيًا عند تلك النقطة . وبالمثل فإن المجال الكهربى المنبعث من الهوائى يمر هو الآخر عبر نفس النقطة ويولد هناك مجالاً مغناطيسيًا .

ولو أنك تمعنت فى الموقف الذى يصوره الشكل 6-22 لرأيت أن المجال الكهربى المبين يتخذ نفس اتجاه المجال الكهربى الذى يولده المجال المغناطيسى المتحرك . وإلى جانب ذلك ، فالمجال المغناطيسى المبين له نفس اتجاه المجال المغناطيسى الذى يولده المجال الكهربى المتحرك . ولهذا نميل إلى القول بأن المجالين الكهربى والمغناطيسى الموجودين فى موجة كهرومغناطيسية يعيدان توليد بعضهما البعض أثناء حركة الموجة خلال الفضاء . دعنا نطرح هذا الفرض ونرى إلى أين يقودنا .

افترض أن المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية يولد كل منهما الآخر أثناء حركة الموجة خلال الفضاء . وعلى هذا تنطبق كل من المعادلتين 5-22 و 6-22 على الموجة . وإذا كان الأمر كذلك فإن B و E لابد أن يرتبطا بنفس الطريقة فى المعادلتين ، ومن ثم يكون ثابتا التناسب بين E و B هما نفس الشيء . إذن

$$\epsilon_0 \mu_0 v = \frac{1}{v}$$

وبحل هذه المعادلة لإيجاد قيمة v ، وهى سرعة الموجة الكهرومغناطيسية فى الفراغ ، نجد أن

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \qquad (22\text{-}7)$$

وهى نفس القيمة التى حصل عليها ماكسويل كما سبق ووصفنا فى القسم 1-22 . ونستنتج إذن مثلما فعل ماكسويل أن :

تنتقل كل الموجات الكهرومغناطيسية خلال الفراغ بالسرعة $c = 2.998 \times 10^8$ m/s ، وأن الضوء أحد صور الموجة الكهرومغناطيسية .

واستطرادًا للموضوع فإن المعادلة 6-22 تعطينا العلاقة بين B و E فى موجة كهرومغناطيسية تنتقل خلال الفراغ :

$$E = cB \qquad (22\text{-}8)$$

مثال 1-22

عندما تمر موجة كهرومغناطيسية ما عبر نقطة فى الفضاء فإن مجالها الكهربى يتغير كالآتى :

$$E = E_0 \sin 2\pi ft$$

حيث $E_0 = 0.0042$ V/m . ما هى سعة المجال المغناطيسى فى هذه الموجة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة المجال المغناطيسى فى الموجة ؟

الإجابة : يوضح الحل المفصل لمعادلة ماكسويل أن المجالين يكونان متفقين فى الطور عند نقطة تبعد كثيرًا عن مصدر الموجة . ولهذا فإن

$$B = B_0 \sin 2\pi ft$$

سؤال : وهل هناك علاقة ثابتة بين E و B فى موجة كهرومغناطيسية ؟

الإجابة : نعم $E/c = B$.

الحل والمناقشة : سنستخدم العلاقة $E/c = B$ فى حالة سعتى المجالين E_0 و B_0 .

$$B_0 = \frac{0.0042 \text{ V/m}}{3\times10^8 \text{ m/s}} = 1.4\times10^{-11} \text{ T}$$

لاحظ مدى ضآلة المجال المغناطيسى فى الموجة الكهرومغناطيسية . إن صغر مقدار المجال B فى المجالات الكهرومغناطيسية هو السبب الرئيسى فى أن المجالات المغناطيسية المستحثة لم يمكن رصدها فى الفترة التى وضع فيها ماكسويل نظريته .

عليك إثبات صحة الوحدات التى ظهرت فى الحل .

مثال 2-22

افترض أن الموجة فى المثال السابق كان ترددها 5×10^8 Hz . وعندما تمر هذه الموجة عبر عروة هوائى كالمبين فى الشكل 9-22 (ب) فإن المجال المغناطيسى يستحث ق.د.ك فى العروة . وللعروة لفة واحدة مساحتها 25 cm^2 وتتعامد مع المجال المغناطيسى للموجة . ما هى القيمة المتوسطة لـ ق.د.ك المستحثة فى العروة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يتناول ق.د.ك المستحثة ؟

الإجابة : إنه قانون فاراداى للحث .

سؤال : ما هى المعلومات التى يتطلبها هذا المبدأ ؟

الإجابة : ينص قانون فاراداى (المعادلة 3-20) على أن $\overline{\text{emf}} = \Delta\Phi_B / \Delta t$. وفى هذه الحالة تكون مساحة العروة متعامدة مع $\mathbf{B}$ ؛ ولهذا فإن الفيض فى أية لحظة هو ببساطة $\Phi_B = BA$. وبما أن A مقدار ثابت فإن $\Phi_B = (\Delta B)A$ و

$$\overline{\text{emf}} = \frac{\overline{\Delta B}}{\Delta t} A$$

سؤال : كيف أستطيع تقدير قيمة معدل تغير الفيض ؟

الإجابة : لقد حصلنا على سعة B من المثال 1-22 ، وتعلم أن المجال المغناطيسى يتغير من B_0 إلى الصفر خلال 1/4 دورة . وعلى الرغم من أن $\Delta B/\Delta t$ ليس ثابتًا خلال هذه الفترة إلا أننا نستطيع الحصول على ق.د.ك المتوسطة باعتباره ثابتًا .

الحل والمناقشة : نستطيع من قيمة التردد $f = 5\times10^8$ Hz أن نجد زمن ربع دورة .

$$\frac{T}{4} = \frac{1}{4f} = \frac{1}{4(5\times10^8 \text{ s}^{-1})} = 5\times10^{-10} \text{ s}$$

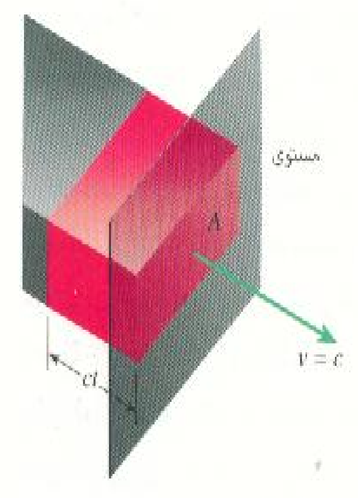
ومتوسط معدل تغير B خلال هذه الفترة الزمنية هو

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{B_0 - 0}{T/4} = \frac{1.4\times10^{-11}\text{T}}{5\times10^{-10}\text{ s}} = 2.8\times10^{-2}\text{ T/s}$$

و ق.د.ك المستحثة المتوسطة هى :

$$\overline{\text{emf}} = \frac{\overline{\Delta B}}{\Delta t}A = (2.8\times10^{-2}\text{ T/s})(25\times10^{-4}\text{ m}^2) = 7.0\times10^{-5}\text{ V}$$

22-6 الطاقة المحمولة بالموجات الكهرومغناطيسية



شكل 12-22:
يمر حجم مقداره Act من حزمة الموجات عبر المستوى فى زمن مقداره t .

لقد عرفنا أن الموجات الكهرومغناطيسية تتكون من مجالين متحركين هما الكهربى والمغناطيسى ولما كان هذان المجالان يحتويان على طاقة ، لذا فالموجات لابد أن تحمل طاقة عبر الفضاء والموجات الكهرومغناطيسية القادمة من الشمس ، مثلاً ، تدفئ الأرض وتمد النباتات بالطاقة اللازمة للنمو . والموجات التى تبثها محطة إرسال تليفزيونى بعيدة ، تحمل الطاقة التى توصل الصورة والصوت إلى أجهزة التليفزيون لدينا . دعنا نقوم بحساب مقدار الطاقة المنقولة إلى سطح ما ، تسقط عليه موجة كهرومغناطيسية .

لاشك أننا نذكر من القسم 12-17 أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم من مجال كهربى مقداره E فى الفراغ هى $\frac{1}{2}\ \epsilon_0 E^2$. كما أننا أوضحنا فى القسم 7-20 أن الطاقة المختزنة فى وحدة الحجوم من مجال مغناطيسى مقداره B هى $B^2/2\mu_0$ وسننظر فى حالة حزمة من الإشعاع الكهرومغناطيسى المبين فى الشكل . إن المساحة الطرفية للحزمة هى A وتنتقل إلى اليمين بسرعة الضوء c . وحيث أن الحزمة تنتقل مسافة مقدارها ct خلال الفترة الزمنية t فإن مسافة مقدارها ct من طول الموجة يخترق المستوى فى هذه الفترة . ومن ثم يكون حجم الحزمة التى تخترق المستوى فى فترة زمنية مقدارها t هو Act وقد أشرنا إلى هذا الحجم بالجزء المظلل فى الشكل .

خلافات فى الفيزياء : طبيعة الضوء

يعتبر الضوء من أكثر الظواهر الفيزيائية التى تشعر بها حواسنا ، أهمية بل وقد يكون من أكثرها إثارة للحيرة . إن إحساسنا بالضوء هو الذى يمدنا بمعرفة شكل وحجم ولون العالم المحيط بنا بدقة كبيرة وقد لاحظ البشر عبر تاريخهم الطويل أن الضوء يصدر عن الشمس والنار والأجسام الساخنة والبرق . وخلق الضوء يظهر فى قصص التكوين فى الديانات الرئيسية . وعلى الرغم من أن الضوء هو الذى يتيح لنا رؤية الأشياء إلا أننا لا نستطيع رؤية الضوء نفسه . أى أننا لا نستطيع أن نحس بالطبيعة الفيزيائية للضوء بشكل مباشر . فهل الضوء مكون من نوع من المادة ؟ وهل هو مكون من تيار من الجسيمات أم هو نوع من الذبذبات أو الموجات ؟ وما هى السرعة التى ينتقل بها ؟ وكيف نتلقى صورة جسم ما ليس بيننا وبينه أى اتصال فيزيائى ؟ إن كلا من العملية التى نستطيع من خلالها الرؤية وطبيعة الضوء ، ظاهرتان كانتا محل تفكير البشر قبل بدء العلوم الحديثة بوقت طويل جداً .

لقد تم فهم عملية تكون الصور بواسطة العدسات بحلول نهاية القرن السابع عشر . وتم الاتفاق على أن الرؤية هي بمثابة العملية التى تنطوى على قيام عدسة العين بتجميع صورة الضوء الساقط على الشبكية . وقد رسخ عالم الفلك الدانماركي رومر - وهو معاصر لنيوتن - حقيقة أن سرعة الضوء ، وإن كانت كبيرة جدًا - إلا أنها محددة وذلك بعد قيامه بإثبات ذلك بالتجربة ، وإن كانت القيمة الحالية لسرعة الضوء أكبر بنحو خمسين بالمائة من النتيجة الأصلية التى حصل عليها رومر . وقد ثبت أن أصعب سؤال مطروح هو **ما هو الضوء** ؟ وهل يتكون من تيار من جسيمات أم من موجات من نوع ما ؟ وعبر العديد من السنين ظهرت آراء كثيرة تعضد أيًا من هذين الرأيين المتنافسين .

دعنا نفحص أولاً ما هو المقصود بكلمة **جسيم** وكلمة **موجة** . يشير هذان المصطلحان من ناحية عامة إلى مفهومين متعاكسين من حيث المبدأ . فالجسيمات عادة ما تكون محددة بموضع فى لحظة ما ، مما يعنى أنها إما أن تكون كنقط مثالية أو أن لها حدود معروفة ومن ثم تكون كميات تحركها وطاقاتها محددة . أما الموجات - على الجانب الآخر - فإنها تمثل حركة متناسقة تمتد عبر مسافات كبيرة . وتعتمد طاقة الموجة على سعة الموجة ؛ وهى ليست محددة بموضوع ولكنها خاصية للموجة بأكملها .

وقد رفض نيوتن النموذج الموجى للضوء ، لأنه اعتبر الفضاء مجرد فراغ خاوٍ وليس به أية مادة لازمة لحمل ونشر الاهتزازات . أما الجسيمات ، على الجانب الآخر فتستطيع الحركة دون أية عوائق خلال الفراغ فى خطوط مستقيمة . أما كون الجسيمات الضوئية لا يبدو عليها أى تأثير بالجاذبية ، فقد عزاه نيوتن إلى سرعتها الفائقة . وقد فسر نموذج الجسيمات قانون الانعكاس ، لأن الاتجاه الذى يسلكه شعاع ضوئى ساقط حين ينعكس على مرآة هو نفس الاتجاه الذى تتخذه كرة حين ترتد بمرونة من سطح ما ، أما الانكسار فقد فسره نيوتن على أنه التجاذب المؤثر على جسيمات الضوء من جانب جزيئات المادة الشفافة . عند مرور تلك الجسيمات داخل المادة . (والانكسار هو تغيير الاتجاه عندما ينتقل الضوء من وسط إلى آخر) . وتغير قوة التجاذب تلك من اتجاه الجسيم وذلك بزيادة مركبة سرعته العمودية على سطح المادة مما يجعل الجسيم ينحرف نحو العمود المقام على السطح . أما حقيقة أن الألوان المختلفة تنكسر بمقادير مختلفة فقد فسر بأن هناك جسيمات ذات ألوان مختلفة وتتفاوت فى كتلها .

وقد صاغ عالم هولندى آخر معاصر لنيوتن وهو كريستيان هيجنز (1629 – 1695) النظرية الموجية للضوء . وقد وجد هيجنز أنه من الصعب تقبل السرعة المفترضة للجسيمات ، كما لاحظ أنه عند تقاطع حزمتين ضوئيتين ، فإن الضوء لا يظهر أية دلائل على التشتت نتيجة تصادم الجسيمات كما هو متوقع عند تقاطع تيارين من الجسيمات . وقد صاغ تفسيرًا هندسيًا (وهو مبدأ هيجنز) لشكل الموجات عند انتشارها عبر فتحات ومن حول حواف الحواجز ، وبذلك وصف ظاهرة الحيود بشكل صحيح . وقد فسرت نظرية هيجنز الانكسار على أساس **تباطؤ** الضوء عند دخوله إلى الوسط خلافًا لنموذج نيوتن . ولم تكن هناك وسيلة متاحة - للأسف - لقياس سرعة الضوء في مادة شفافة بحيث يمكن عندئذ الاختيار بين هاتين النظريتين المتنافستين . على أن نموذج نيوتن للجسيمات هو الذى ساد خلال القرن الثامن عشر نظرًا لسمعة نيوتن وتأثيره .

ثم قدم العالم الإنجليزى توماس يونج عام 1804 أول اختبار حاسم للنموذجين المتنافسين للضوء ، فقد أجرى تجربة (القسم 24-3) اتضح منها أن مصدرين نقطيين للضوء يمكن أن ينتجا نمطًا لشدة الضوء ذا توزيع مماثل تمامًا لمجموع شدتى موجتين متراكبتين وتوزيعهما ناتج عن تداخل الموجتين . وبما أن الجسيمات ليست لها خاصية تداخل السعات ، فإن نتائج يونج أثبتت أن للضوء - بالفعل - خواص موجية .

على أن هذه النتيجة لم يعترف بها إلا بعد نحو خمسة عشر عامًا عندما قام فيزيائى فرنسى هو أوجستين فرينل بصياغة النظرية الرياضية لتجربة يونج . وقد اقترحت نظرية فرينل أن الضوء عبارة عن **موجات مستعرضة** . وقد عزز ذلك الملاحظات التى بينت أن الضوء يمكن استقطابه (1808 – 1815) . وقد كانت تلك الملاحظات تعارض هى الأخرى نموذج الجسيمات ، لأن حزمة الجسيمات ليس لها خاصية الاستقطاب طبقًا للنظرية الكلاسيكية . وأخيرًا تمكن الفيزيائى الفرنسى فيزو من إجراء

قياسات مباشرة لسرعة الضوء فى الماء ، فوجد أن هذه السرعة أقل من سرعة الضوء فى الهواء . وقد أيدت هذه النتائج ـ التى تعارض نموذج نيوتن للجسيمات مباشرة ـ نظرية هيجنز الموجية لتفسير الانكسار .

وإذ توافرت كل هذه الأدلة فقد كان منتظرًا أن تختفى الشكوك التى أحاطت بالطبيعة الموجية للضوء . على أن هذا لم يحدث ؛ فقد ظل هناك سؤال قائم وهو : « كيف ينتقل الضوء خلال الفراغ حيث لا مادة هناك تقوم بحمل الموجات ؟ » إن السرعة الهائلة للضوء تتطلب أن يكون الوسط المهتز جاسئًا للغاية وألا يشكل فى الوقت ذاته أية مقاومة لمرور الكواكب من خلال . ولم يستطع الإجابة عن ماهية الشيء المتموج حتى أولئك الذين وافقوا على قبول النموذج الموجي .

وكما رأينا في هذا الفصل ، فإن ماكسويل هو الذى قدم الإجابة على هذا السؤال الأخير من خلال نظريته عن المجالات الكهربية والمغناطيسية المهتزة . كما إنه تنبأ بوجود طيف كامل للموجات الكهرومغناطيسية التى يشكل الضوء جزءًا ضئيلا منه . ولقد كان لا يزال ثابتًا فى الأذهان أن هناك وسطًا (يقال له الأثير) لابد وأن يكون موجودًا . وأن خواص ذلك الوسط هى التى تحدد السرعة المطلقة للضوء . وقد حاول مايكلسون فى ثمانينيات القرن (19) أن يعين سرعة الأرض عبر الأثير المحيط بها باستخدام مقياس التداخل الذى ابتكره (القسم 1-26) لقياس الفرق فى سرعة الضوء والذى تنبأت به نظرية الأثير عندما تدور الأرض داخل مدارها وذلك فى اتجاهين متعاكسين مرة كل ستة أشهر . ولكنه لم يستطع هو ومساعده مورلى أن يقيسا أى فرق فى سرعة الضوء ، على الرغم من أن مقياس التداخل لديهما كان ذا حساسية كافية لتعيين الفرق المتوقع وهو 36 mi/s . ودفعت هذه الحقيقة معظم الفيزيائيين إلى استنتاج أن الأثير شيء غير موجود على الإطلاق . وهكذا فقد بدا بانقضاء القرن التاسع عشر أن السؤال العريق حول طبيعة الضوء قد أجيب بشكل نهائى . وأن الضوء هو موجة غير مادية تتكون من مجال كهربى وآخر مغناطيسى يهتزان ، وأن الموجة تنتقل عبر الفراغ دون الحاجة إلى وجود جسم مادى لنقلها .

إلا أن الطبيعة ـ على ما يبدو ـ تدخر دائمًا مفاجآت محيرة تظهر فى اللحظة التى نظن فيها أننا وصلنا إلى الحل المريح فى النهاية ، فقد شهدت السنوات الأخيرة من القرن التاسع عشر والسنوات الأولى من القرن العشرين تحديات تتصدى لفهمنا لطبيعة الضوء . واتضح أن طيف الضوء الذى تشعه الأجسام الساخنة (القسم 7-26) لا يمكن تفسيره من خلال النموذج الموجى ، الذى لم يتمكن أيضًا من تفسير الأثر الكهروضوئى (القسم 8-26) حيث تنطلق الإلكترونات من أسطح الفلزات إذا تعرضت تلك الأسطح للضوء . ولم تفسر هاتان الظاهرتان بشكل دقيق وأنيق (على يدى بلانك ومن بعده أينشتين) إلا عند اعتبار الضوء مكونًا من تيار من الجسيمات التى أطلق عليها **فوتونات** والتى تنتقل بسرعة الضوء وتحمل مقدارًا من الطاقة يتناسب مع تردد الضوء . ثم لاحظ كومتون فى عشرينيات القرن العشرين أنه عندما ترتطم أشعة إكس بالإلكترونات فإنها تتبادل معها الطاقة وكمية التحرك كما لو كانت تلك الأشعة بمثابة جسيمات تتصادم بمرونة مع الإلكترونات . (القسم 9-26) .

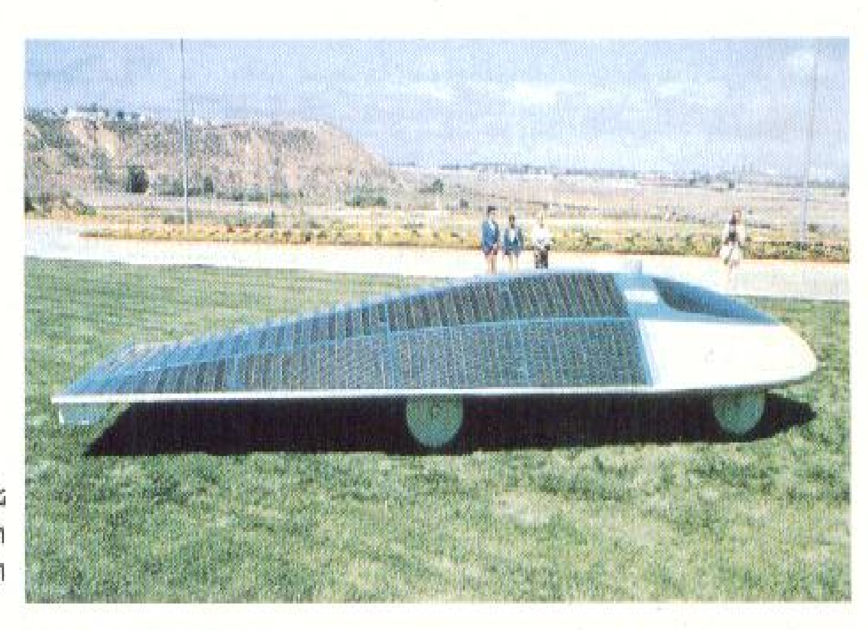
وكما لو كانت التطورات السالفة غير كافية لإثارة الارتباك ، فقد قام الفيزيائى الفرنسى دى برولى بوضع نظرية مفادها أن الجسيمات المادية لابد وأن تصاحبها « موجة مادية » يتناسب طولها الموجى عكسيًا مع كمية تحرك الجسيم (القسم 10-26) فإذا صحت هذه النظرية فإن الجسيمات المارة من خلال فتحات ضيقة لابد وأن تعانى من تأثيرات موجية مثل الحيود والتداخل . وقد شوهد حيود الإلكترونات بالفعل عام 1927 مما يؤيد تنبؤات دى برولى (القسم 10-26) . كما رصدت منذ ذلك الوقت تأثيرات موجية مصاحبة لحزم البروتونات والنيوترونات .

وهكذا نصل إلى الوضع الراهن الذى يتمتع فيه الضوء بطبيعة **ثنائية** : إذ يظهر طبيعة موجية فى بعض التجارب وسلوكًا شبيهًا بسلوك الجسيمات فى تجارب أخرى . ونفس الوضع قائم لتلك الكيانات الدقيقة للمادة والتى نسميها جسيمات . ومن الأهمية بمكان أن نذكر أن نوعًا واحدًا فقط من السلوكين المتعاكسين هو الذى يتجلى فى تجربة ما . وهكذا فإن الإجابة على سؤالنا الأصلى حول طبيعة الضوء معقدة بصورة غير متوقعة (بل ومربكة بالنسبة للكثيرين) : إن كون الضوء مكون من موجة أو تيار من الجسيمات يعتمد على السؤال الذى صممت تجربة من التجارب لكى تجيب عليه .

دعنا الآن نختار فترة زمنية قصيرة t بحيث يكون المقدار ct أصغر بكثير من الطول الموجى لإشعاع الحزمة الضوئية ، وهكذا يكون كل من $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ ثابتين بالضرورة خلال الحجم المظلل ، ونستطيع من ثم كتابة الطاقة المحمولة عبر المستوى بواسطة الحزمة التى حجمها Act لتكون :

$$\text{الطاقة فى الحجم } Act = \left(\begin{array}{c}\text{كثافة طاقة}\\ \text{المجال المغناطيسى}\end{array}\right)(\text{الحجم}) + \left(\begin{array}{c}\text{كثافة طاقة}\\ \text{المجال الكهربى}\end{array}\right)(\text{الحجم})$$

$$\text{الطاقة فى } Act = \frac{B^2}{2\mu_0}Act + \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 Act$$



تقوم الخلايا الشمسية بتحويل الإشعاع الشمسى إلى تيار كهربى يكفى لإدارة هذا السيارة التجريبية .

ولكى نحسب مقدار الطاقة المارة عبر وحدة المساحات من المستوى وفى وحدة الزمن فما علينا إلا أن نقسم المقدار السابق على t وعلى المساحة A للحزمة . وإذن

$$\text{الطاقة لوحدة المساحات فى الثانية} = \frac{c}{2}\left(\frac{B^2}{\mu_0} + \epsilon_0 E^2\right)$$

ويطلق على هذا المقدار شدة الموجة I . وبما أن $B^2 = E^2/c^2 = E^2\epsilon_0\mu_0$ فإن المعادلة يمكن كتابتها على الصورة :

$$I = \text{الطاقة لوحدة المساحة فى الثانية} = \frac{1}{2}c\epsilon_0(E^2 + E^2) = c\epsilon_0 E^2$$

وتشير المعادلة الأخيرة إلى أن للحد الخاص بكل من المجالين الكهربى والمغناطيسى نفس المقدار . ونستنتج من ثم أن :

ينقل المجال الكهربى والمجال المغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية مقادير متساوية من الطاقة .

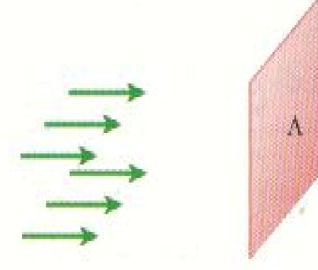
إن الشدة التى حسبناها الآن ذات قيمة **لحظية** لأننا اعتبرنا t كسرًا صغيرًا جدًا من الزمن الدورى للموجة . أما متوسط الشدة عبر كل دورة فهو على درجة أكبر من الأهمية ، ولحسابه نحتاج إلى معرفة القيمة المتوسطة للمقدار E^2 فى دورة واحدة . وقد وجدنا عند دراسة التيارات المترددة أن متوسط مربع أى مقدار يتغير جيبيًا هو نصف مربع السعة ، أو $\overline{E}^2 = \frac{1}{2}E_0^2$.

$$\overline{I} = \text{القدرة فى وحدة المساحات} = \text{متوسط الطاقة المحمولة لوحدة الزمن ووحدة المساحات} = \frac{1}{2}c\,\epsilon_0 E_0^2 \qquad \text{(22-9) (أ)}$$

أو ـ إذا شئنا ـ يمكننا كتابة $\overline{I}$ بدلالة B_0 وهى سعة موجة المجال المغناطيسى ، ونذكر أن $E = cB$ ولذا ،

$$\overline{I} = \text{القدرة فى وحدة المساحات} = \frac{1}{2}c\,\epsilon_0 c^2 B_0^2 = \frac{2B_0^2}{2\mu_0} \qquad \text{(22-9) (ب)}$$

حيث استخدمنا العلاقة $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$. ونستنتج من ثم أن (راجع الشكل 13-22) .



شكل 13-22:
شدة حزمة من الضوء هى الطاقة المارة خلال وحدة المساحات فى الثانية ، على أن تكون الحزمة متعامدة مع المساحة .

متوسط القدرة المنقولة عبر وحدة المساحات بواسطة موجة كهرومغناطيسية تسقط متعامدة على المساحة هو $\frac{1}{2}c\,\epsilon_0 E_0^2 = cB_0^2/2\mu_0$. ويسمى هذا المقدار شدة الموجة .

ووحدات SI للشدة هى وات لكل متر مربع (W/m^2) . وعليك إثبات أن الكميات الواردة فى المعادلتين (22-9) (أ) و (22-9) (ب) لهما بالفعل هذه الوحدة .

مثال 3-22

يصدر جهاز ليزر معملى حزمة قطرها 1 mm وقدرتها 1 mW . ما هى شدة هذه الحزمة وما هى مقادير المجالين الكهربى والمغناطيسى ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو تعريف الشدة ؟

الإجابة : الشدة هى القدرة لوحدة المساحات . ولدينا هنا قدرة الحزمة وكذا مساحة الحزمة $A = \pi r^2$.

سؤال : كيف ترتبط مقادير المجالات بالشدة ؟

الإجابة : لديك $I = \epsilon_0 c E_0^2/2$ وهى أيضا تساوى $cB_0^2/2\mu_0$. ولك أن تختار إحدى المعادلتين .

سؤال : ما هى العلاقة بين E_0 و B_0 ؟

الإجابة : إنها ببساطة $E_0 = cB_0$.

الحل والمناقشة : الشدة هى

$$I = \frac{10^{-3}\ \text{W}}{\pi(0.5\times10^{-3}\ \text{m})^2} = 1.27\times10^3\ \text{W/m}^2$$

وإذا اخترنا التعبير عن I بالمعادلة : $I = cB_0^2/2\mu_0$ نحصل على :

$$B_0^2 = \frac{2\mu_0 I}{c}$$

$$= \frac{2(4\pi\times10^{-7}\ \text{N/A}^2)(1.27\times10^3\ \text{W/m}^2)}{3\times10^8\ \text{m/s}}$$

$$= 1.07\times10^{-11}\ \text{T}^2$$

ولذلك $B_0 = 3.27\times10^{-6}\ \text{T}$ وفى النهاية

$$E_0 = cB_0 = (3\times10^8\ \text{m/s})(3.27\times10^{-6}\ \text{T}) = 9.8\times10^2\ \text{V/m}$$

ومن المثير للاهتمام أن شدة حزمة الليزر هذه تناهز شدة ضوء الشمس عند قمة جو الأرض وهى $1.4\times10^3\ \text{W/m}^2$. ويلاحظ أيضًا أن المجال المغناطيسى فى الحزمة لا يتجاوز عُشر (1/10) القيمة النموذجية للمجال المغناطيسى للأرض .

22-7 قانون التربيع العكسى للإشعاع



لقد أمكن الحصول على صور كهذه لأحد أقمار كوكب نبتون وهو القمر ترايتون وقد أرسلتها سفينة الفضاء فويجير c . وتعتمد الصورة على مقدرتنا على استقبال ومعالجة الإشارات الكهرومغناطيسية ذات الشدة الخافتة للغاية . وعندما التقطت هذه الصورة كانت فويجير على مسافة تبعد 330,000 ميل عن القمر ترايتون . أما المسافة التى قطعتها الإشارة لكى تصل إلى الأرض فقد زادت على 3 بليون ميل !

أشرنا فى القسم السابق أن شدة حزمة من الإشعاع تعرف بالطريقة الآتية فنتخيل مساحة ما A موضوعة بحيث تتعامد مع الحزمة كما فى الشكل 22-13 . ولما كانت الحزمة (ولتكن حزمة ضوئية) تحمل طاقة فى اتجاه انتشارها (وفى هذه الحالة إلى اليمين) ، فإن قدرًا معينًا من الطاقة سيمر عبر المساحة فى وحدة الزمن ويكون تعريف شدة الضوء I ممثلاً بالعلاقة التالية :

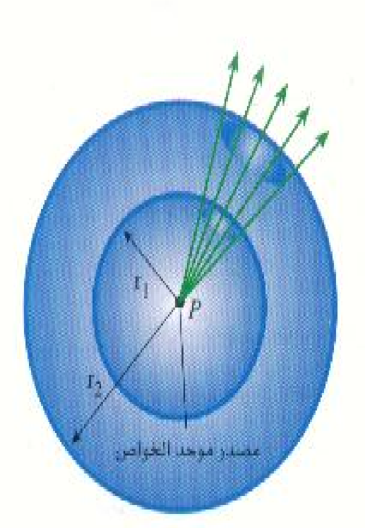
$$I = \frac{\text{الطاقة}}{\text{المساحة} \times \text{الزمن}} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

دعنا الآن نفحص الطاقة المنبعثة من مصدر ضوئى صغير كالمبين فى الشكل 22-14 . وسنعتبر المصدر من الصغر بحيث يمكن اعتباره **مصدرًا نقطيًا** ، وسنعتبره بعد ذلك مصدرًا **موحد الخواص** ، أى مصدر يبعث الضوء فى كل اتجاه بالتساوى . ولكى نصف الطاقة التى تنطلق من هذا المصدر ، سنتخيل سطحًا كرويًا نصف قطره r_1 ويتحد مركزه مع المصدر الضوئى وسيكون I_1 هو رمز شدة الضوء عن هذا السطح . كما أن الشدة لابد أن تكون متساوية عند جميع نقط الكرة لأننا اعتبرنا المصدر يبعث الضوء بالتساوى فى جميع الاتجاهات ، أى موحد الخواص . وبعبارة أخرى فإن I_1 ستكون هى شدة الضوء عند نقطة تبعد r_1 عن المصدر .

وحيث أن كرتنا التخيلية تحيط تمامًا بالمصدر ؛ فإن كل الطاقة المنبعثة من المصدر لابد وأن تعبر خلال سطح الكرة ، الذى مساحته $4\pi r_1^2$. والمعدل الكلى الذى يبعث به

المصدر من الطاقة هو قدرة ذلك المصدر P ، ومن هنا نستنتج أن الشدة علـى بعـد r_1 مـن المصدر هو

$$I_1 = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} = \frac{P}{4\pi r_1^2}$$



شكل 14–22:
إذا كان مقدار القدرة التى يبعثها المصـــدر هو P فما هى قيم شـــدة الإشعـــاع عنـــد المسافات r_1 و r_2 ؟

افترض الآن وجود كرة ثانية أكبر من الأولى ونصف قطرها r_2 ولـها نفس مركـز الكـرة الأولى . وإذا تتبعنا نفس الاستدلال لوجدنا أن الشدة I_2 عند مسافة مقدارها r_2 هى :

$$I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$$

(كل ذلك بالطبع إذا اعتبرنا أنه لا يوجد امتصاص للطاقة عند انتقالـها بعيدًا عـن المصـدر) وبأخذ النسبة بين الشدتين نجد أن :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad (22\text{–}10)$$

وهذا هو ما يطلق عليه **قانون التربيع العكسى لإشعاع الطاقة من مصدر نقطى .**
وينص على أن شدة الضوء الصادر من مصدر ما تتناقص تبعًا لمقلوب مربع المسافة المقاسة بعيدًا عن المصدر . ولو أننا ضاعفنا المسافة ثلاث مرات ، مثلاً ، بعيدًا عـن المصـدر فـإن شدة الضوء تتناقص بمعامل قدره 9 .

مثال 4-22

تبلغ شدة ضوء الشمس ، كما ذكرنا فى المثال 3–22 $1.4\ \text{kW/m}^2$ عند قمة جو الأرض ويطلق على هذا الرقم **الثابت الشمسى** . باعتبار أن الشمس تشع ضوءها فى جميـع الاتجاهـات بالتساوى ، فكم يكون مقدار القدرة الخارجة (وهو ما يسمى أيضًا ضيائية الشمس) ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين الشدة التى نقيسها وقدرة المصدر ؟

الإجابة : إنها المعادلة 10–22 : $I = \dfrac{P}{4\pi r^2}$

سؤال : ما هى r ؟

الإجابة : إنها المسافة بين الشمس والأرض وهى مذكورة فى جدول الثوابـت الفيزيائيـة والبيانات فى صفحة الغلاف الأخير للكتاب $r = 1.5 \times 10^{11}\ \text{m}$.

الحل والمناقشة :

$$P = I\,(4\pi r^2) = (1.4 \times 10^3\ \text{W/m}^2)(4\pi)(1.5 \times 10^{11}\ \text{m})^2 = 3.96 \times 10^{26}\ \text{W}$$

تمرين : تبلغ المسافة بين كوكب نبتون والشمس قدر المسافة بين الشمس والأرض ثلاثـين مرة . ما هى شدة ضوء الشمس عند موقع نبتون ؟ **الإجابة** : $1.6\ \text{W/m}^2$.

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الموجة الكهرومغناطيسية ، (ب) الطيف الكهرومغناطيسى ، (جـ) الموجة اللاسلكية (الراديو) ، (د) الرادار أو الموجات الدقيقة ، (هـ) الإشعاع تحت الأحمر ، (و) الضوء المرئى ، (ز) الإشعاع فوق البنفسجى ، (ح) أشعة إكس . (ط) أشعة جاما ، (ى) شدة الموجات الكهرومغناطيسية .

2 أن تصف فرض ماكسويل حول التيار الإزاحى .

3 أن تعطى تعبيرًا عن سرعة الضوء بدلالة الثابتين الكونيين μ_0 و ϵ_0 .

4 أن تحسب الطول الموجى لموجة كهرومغناطيسية إذا عرفت ترددها أو العكس .

5 أن تخطط شكل المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية .

6 أن تصف العلاقة بين شدتى المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية .

7 أن تشرح بطريقة وصفية كيفية انبعاث الموجات الكهرومغناطيسية من هوائى ثنائى القطب .

8 أن تصف طريقتين يمكن من خلالهما إكتشاف موجات لاسلكية بواسطة جهاز استقبال الراديو . وأن تشرح وظيفة دائرة RLC فى جهاز راديو وكيف تستخدم فى التقاط الإشارات المبثوثة من محطات مختلفة .

9 أن تضع قائمة لأنواع الموجات الكهرومغناطيسية حسب أطوالها الموجية فى ترتيب تنازلى . وأن تذكر نوع الموجة التى ينتمى إليها طول موجى معين .

10 أن تحسب شدة موجة ما إذا عرفت قيم كل من E_0 أو B_0 .

11 أن تحسب سعتى المجالين الكهربى والمغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية إذا أعطيت شدة الموجة .

12 أن تطبق قانون التربيع العكسى للإشعاع فى حالات بسيطة .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية :

سرعة الضوء (c)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

تيار ماكسويل الإزاحى (I_D)

يمكن توليد مجالات مغناطيسية بواسطة مجالات كهربية تتغير مع الزمن وأيضًا بواسطة تيار I . وتأثير المجال E المتغير مع الزمن يمكن النظر إليه على أنه يحدث تيارًا تخيليًا ـ تصوريًا ـ I_D يسمى التيار الإزاحى ، حيث

$$I_D = \epsilon_0 A \ \frac{\Delta E_\perp}{\Delta t}$$

$E_\perp$ هنا هى مركبة $\mathbf{E}$ العمودية على مستوى المساحة A . ويولد التيار I_D مجالاً مغناطيسيًا بنفس الطريقة التى يولد بها تيار حقيقى مجالاً مغناطيسيًا . فإذا كان هناك كل من I_D و I فإن المجال المغناطيسى ينتج عن تيار كلى فعال هو $I_{tot} = I + I_D$.

العلاقة بين سعتى المجالين الكهربى والمغناطيسى فى الموجات الكهرومغناطيسية

$$B = \frac{E}{c}$$

كثافة الطاقة فى موجة كهرومغناطيسية

$$\frac{\text{الطاقة}}{\text{الحجم}} = \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

أى أن المجالين الكهربى والمغناطيسى يمثلان كثافتى طاقة متساويتين .

شدة الموجات الكهرومغناطيسية (I)

تعرف شدة موجة على أنها متوسط القدرة المنقولة عبر وحدة المساحات :

$$I = \frac{1}{2} c\, \epsilon_0 E_0^2 = \frac{\frac{1}{2} c B_0^2}{\mu_0}$$

أى أن المجالين الكهربى والمغناطيسى ينقلان كميات متساوية من الطاقة .

قانون التربيع العكسى للإشعاع

تتغير شدة الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من مصدر نقطى عكسيًا مع مربع المسافة بين نقطة الرصد والمصدر ، ولهذا إذا كانت r_1 و r_2 تمثلان مسافتين من المصدر فإن النسبة بين الشدتين عند هاتين المسافتين هى

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

أسئلة وتخمينات

1 يكون هوائى الإرسال (البث) فى بعض محطات الإذاعة رأسيًا ، بينما يكون أفقيًا فى البعض الآخر . صف وقارن بين الموجات الكهرومغناطيسية المبثوثة من هذين النوعين للهوائيات . وعلى وجه الخصوص ، كيف تتجه **E** و **B** بالنسبة لسطح الأرض .

2 إذا فتحت جهاز راديو ترانزستور فإنك ستلاحظ كيف يركب فيه هوائى على هيئة ملف . كيف نستطيع أن نستخدم الراديو لتحدد ما إذا كان هوائى محطة إرسال بعيدة أفقيًا أم رأسيًا ؟

3 تمر عبر المنطقة المحيطة بك موجات كهرومغناطيسية تبثها معظم محطات الإذاعة فى العالم . كيف يضبط جهاز راديو أو تليفزيون لكى يلتقط محطة تود الاستماع إليها ؟ وعندما تدير مؤشر الراديو فماذا يحدث بالضبط داخل الجهاز لالتقاط المحطات المختلفة .

4 هناك نوعان من هوائيات الاستقبال فى أجهزة الراديو والتليفزيون . يلتقط أحدهما الجزء الكهربى من الموجة الكهرومغناطيسية ويلتقط الآخر الجزء المغناطيسى . افحص جهاز راديو ترانزستور للجيب أو جهاز راديو كبير وحاول أن تعرف أن الطريقتين يستخدم . هل من الممكن استخدام الطريقتين ؟

5 نشاهد من حين لآخر فى دور السينما أو على شاشة التليفزيون رجال الشرطة وهم يحاولون تحديد موقع محطة إرسال لاسلكى سرية وذلك بقيادة سيارة فى المناطق المجاورة ومثبت بالسيارة جهاز يتصل به ملف يدور ببطء من فوق ظهر السيارة . اشرح طريقة عمل الجهاز .

6 يدعي بعضهم ، إنه بالقرب من هوائي إرسال لاسلكي (إذاعي) شديد القدرة ، تصدر أحيانًا شرارة تتقافز عبر سور من السلك . ما رأيك في هذا الإدعاء ؟

7 يتعرض الطعام والأواني في فرن الميكروويف لموجات رادار (كهرومغناطيسية) ذات تردد عالٍ جدًا . ولو تركت ملعقة عفوًا داخل أحد تلك الأفران فإنها تصبح ساخنة جدًا . ما الذي يسخنها هكذا ؟ هل تستطيع تفسير الأثر التسخيني في إطار الجزء الكهربي من الموجة ؟ أم الجزء المغناطيسي ؟ كيف يتم تسخين المواد غير المعدنية في الفرن ؟ وهل يمكن تسخين طبق زجاجي في مثل هذا الفرن ؟

8 هناك بعض الشك حول السلامة البشرية عند التعرض لموجات اللاسلكي القوية أو الموجات الدقيقة (الميكروويف) . كيف لنا أن نتوقع اعتماد تلك الأخطار على تردد الموجات ؟ أي الموجات أكثر خطرًا في رأيك (إذا كان هناك خطر) ، موجات الراديو (اللاسلكي) أم الموجات الدقيقة (الميكروويف) ؟

9 ارجع إلى الشكل 10-22 . أوجد اتجاه المجال الكهربي عند النقطة A والذي يستحثه المجال المغناطيسي المتحرك .

10 ارجع إلى الشكل 10-22 أوجد اتجاه المجال المغناطيسي عند النقطة P والذي يستحثه المجال الكهربي المتحرك .

11 هل رسم اتجاه وطور الجزء المغناطيسي للموجة في الشكل 6-22 بشكل صحيح إذا كان المجال المغناطيسي ناتجًا عن المجال الكهربي المتحرك ؟ أعد المسألة بالنسبة للمجال الكهربي الناتج عن المجال المغناطيسي المتحرك .

12 ضع تقديرًا للطول الموجي لموجة كهرومغناطيسية تنتج عن ذبذبة كرة موجبة الشحنة معلقة من حبل طوله متر واحد وتعمل كبندول . قارن بين هذا الطول الموجي مع قطر الكرة الأرضية الذي هو 12,700 km .

مسائل

الأقسام من 1-22 إلى 4-22

1 ما هو الطول الموجي لموجات كهرومغناطيسية يشعها مصدر قدرة تردده 50 Hz ؟

2 ما هو تردد الموجات الكهرومغناطيسية التي أطوال موجاتها : (أ) 1.2 m ، (ب) 12 m و (جـ) 120 m ؟

3 ما هو مدى الأطوال الموجية الذي يغطيه إرسال محطة AM إذاعية تردداتها في المدى من 540 إلى 1600 kHz ؟

4 ما هو مدى الأطوال الموجية لموجات كهرومغناطيسية تبثها موجة FM الإذاعية بترددات تقع في المدى من 88 إلى 108 kHz .

5 تكون حساسية العين عند حدها الأقصى بالنسبة للجزء الأخضر المصفر من الطيف الكهرومغناطيسي الذي يبلغ طوله الموجي نحو 5.5×10^{-7} m . ما هو تردد هذا الضوء ؟

■ 6 ضبط جهاز الراديو لديك لكي يلتقط محطة إذاعة على بعد 144 km منك . (أ) ما الزمن الذي تستغرقه إشارة كهرومغناطيسية صادرة من المحطة حتى تصل إلى جهازك ؟ وإذا كانت المحطة تعمل عند تردد مقداره 980 kHz فما عدد الأطوال الموجية بينك وبين المحطة ؟

■ 7 ترتد نبضة رادار تبثها سيارة شرطة إلى جهاز الاستقبال بعد انعكاسها من على شاحنة بعيدة بعد زمن كلي مقداره 5×10^{-4} s . ما المسافة التي تبعد بها الشاحنة عن عربة الشرطة ؟

8 وقع انفجار على بعد 4.0 km من راصد . ما هي الفترة الزمنية بين رؤية الراصد للانفجار وسماعه صوته ؟ (اعتبر سرعة الصوت 340 m/s) .

9 ضبطت دائرة المولفة في جهاز راديو ليلتقط محطة إذاعية بحيث كانت قيمة المحاثة في الدائرة 6.4 μH وقيمة السعة 1.9 pF . (أ) ما هو تردد الموجات التي يلتقطها الجهاز ؟ (ب) وما هو طولها الموجي ؟

10 يستخدم جهاز راديو لالتقاط محطة إذاعية تعمل عند تردد مقداره 840 kHz . فإذا كانت دائرة المولفة تحتوي على محاثة مقدارها 0.04 mH ، فما هي سعة المكثف الواجب توافرها لالتقاط هذه المحطة ؟

11 يبلغ تردد قناة تليفزيونية ما نحو 96 MHz . وكانت دائرة موالفة جهاز التليفزيون تستخدم محاثة مقدارها 6.0 μH . ما هي قيمة سعة المكثف المطلوب لاستقبال قناة التليفزيون المطلوبة ؟

■ 12 تبلغ محاثة ملف فى دائرة موالفة جهاز راديو 3 μH . أوجد مدى قيم مكثف الموالفة التى لابد من توافرها حتى يتم التقاط كل مدى ترددات FM وهى ما بين 88 MHz و 108 MHz .

القسم 5–22

13 تبلغ شدة المجال المغناطيسى عند طرف قضيب مغناطيسى $B = 0.85$ T . ثم زود المغناطيس بسرعة مقدارها 10.0 m/s فى اتجاه متعامد مع طوله . (أ) ما هو مقدار المجال الكهربى المستحث عند نقطة ما عند ما يمر بها طرف ذلك القضيب ؟ (ب) هل من السهولة ملاحظة ذلك المجال الكهربى ؟

14 افترض أنه فى الشكل 10–22 يتحرك قطبا المغناطيس بسرعة مقدارها $v = 8.0$ m/s وأن شدة المجال المغناطيسى B بين القطبين هى 0.6 T . (أ) ما مقدار المجال الكهربى عند النقطة A فى اللحظة المشار إليها ؟ (ب) وهل يمكن ملاحظة ذلك المجال بسهولة ؟ (جـ) ما هو اتجاه المجال الكهربى عند النقطة A ؟

■ 15 افترض أن شدة المجال الكهربى عند النقطة P فى الشكل 11–22 كانت 8×10^3 V/m نتيجة للشحنة فى السلك ، وأن سرعة السلك كانت $v = 6.0$ m/s . (أ) ما مقدار المجال المغناطيسى المستحث عند النقطة P ؟ (ب) وهل هذا المقدار من الكبر بحيث يسهل قياسه ؟ (جـ) ما هو اتجاه المجال المغناطيسى عند P ؟

■ 16 تبلغ شدة المجال الكهربى بين لوحى مكثف هوائى متوازى اللوحين 5×10^4 V/m . افترض أن المكثف قد حُرِّك موازيا للوحيه بسرعة مقدارها 7.2 m/s . (أ) ما هو مقدار المجال المغناطيسى B عند نقطة يعبرها المجال الكهربى عند تحركه ؟ (ب) وما هو اتجاه ذلك المجال المغناطيسى ؟

17 إذا كانت سعة موجة المجال المغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية هى 1.0 T . فما هى سعة موجة المجال الكهربى الواجب توافرها ؟

18 تبلغ سعة المجال الكهربى فى موجة لاسلكى 0.90 mV/m عند نقطة معينة . ما هى القيمة القصوى لفرق الجهد الذى تستحثه الموجة بين طرفى قطعة من السلك طولها 20 cm وموضوعة عند تلك النقطة ؟

19 تعطى قيمة المجال الكهربى فى موجة كهرومغناطيسية بالمعادلة : $E = 8.0 \times 10^{-4} \cos (6 \times 10^{10} t)$V/m . اكتب معادلة موجة المجال المغناطيسى . ما هو تردد الموجة ؟ وما هو الطول الموجى لها ؟

■ 20 يمثل المجال المغناطيسى فى موجة كهرومغناطيسية معينة بالمعادلة : $B = 4 \times 10^{-11} \sin (8 \times 10^{9}\, t)$T . (أ) ما هو تردد الموجة ؟ (ب) وما هو الزمن الدورى لها ؟ (جـ) ما مقدار تغير B عندما يتغير t من الصفر حتى T/4 ، حيث T هو الزمن الدورى المحسوب فى (ب) ؟

■ 21 أوجد متوسط ق.د.ك المستحثة فى المسألة رقم (20) خلال الفترة من $t = 0$ إلى $t = T/4$ داخل عروة من السلك (مساحتها $A = 10.0$ m^2) موضوعة بحيث تتعامد مع خطوط المجال المغناطيسى .

■ 22 توصف موجة المجال الكهربى فى موجة كهرومغناطيسية معينة بالمعادلة التالية : $E = 1.0 \times 10^{-2} \sin (3 \times 10^{9})$V/m . (أ) أوجد الزمن الدورى للموجة . (ب) اكتب المعادلة التى تمثل المجال المغناطيسى فى الموجة . (جـ) ما هى أقصى ق.د.ك مستحثة فى قضيب معدنى طوله 40 cm وهو فى وضع موازٍ لخطوط المجال الكهربى ؟

القسمان 6–22 و 7–22

23 يستخدم ليزر قدرته 0.60 mW فى تجربة معملية ، وكانت حزمة الليزر أسطوانية الشكل ومساحة مقطعها المستعرض

$0.85\ mm^2$. وباعتبار أن الحزمة مكونة من موجة جيبية منفردة ، أوجد القيم القمية لكل من المجالين الكهربى والمغناطيسى E_0 و B_0 فى الحزمة .

24 يرسل نور كشاف إشعاعًا كهرومغناطيسيًا قدرته 4000 W على هيئة حزمة أسطوانية قطرها 0.8 m . باعتبار أن الحزمة مكونة من موجة جيبية منفردة . احسب قيمتى E_0 و B_0 فى الحزمة .

25 متوسط شدة الإشعاع الشمسى الذى يصل إلى قمة جو الأرض هو $1340\ W/m^2$. احسب مقادير المجالين الكهربى والمغناطيسى لموجة كهرومغناطيسية مكافئة .

26 تشع بصيلة إضاءة قدرتها 25 W بانتظام فى جميع الاتجاهات . احسب القيم القصوى للمجالين الكهربى والمغناطيسى لموجة كهرومغناطيسية مكافئة . (أ) على مسافة مقدارها 2 m و (ب) 5 m من البصيلة .

27 تبلغ شدة موجة صادرة من محطة إذاعة بعيدة ترددها 1.4 MHz ، ما مقداره $4.0\ 10^{-10}\ W/m^2$. اكتب معادلتى موجتى المجال الكهربى والمجال المغناطيسى فى هذه المنطقة .

▪ 28 تبلغ مساحة المقطع المستعرض لحزمة ليزر $3.6\ mm^2$ وقدرته 1.2 mW . باعتبار أن حزمة الليزر تتكون من موجة جيبية منفردة ، أوجد شدة الحزمة والقيمتين القصوتين للمجالين الكهربى والمغناطيسى E_0 و B_0 فى الحزمة .

29 يرسل جهاز إرسال إذاعى موجات ترددها 96 MHz بقدرة 65 W . اعتبر أن الإشعاع منتظم على سطح كرة يقع على جهاز الإرسال عند مركزها . (أ) ما هى شدة الموجات عند نقطة تبعد 12 km عن جهاز الإرسال ؟ (ب) ما هما سعتا موجتى المجالين الكهربى والمغناطيسى عند هذه النقطة ؟

30 تتدلى بصيلة مصباح صغير من سقف فى منتصف غرفة ما . ما هى النسبة المئوية التى تتناقص بها شدة الضوء الصادر من البصيلة إذا تحركنا من نقطة تبعد 4.0 m من البصيلة إلى نقطة أخرى تبعد 9.0 m عنها ؟

▪ 31 احسب شدة الضوء التقريبية عند سطح منضدة طعام يبعد مسافة 1.8 m عن بصيلة إضاءة قدرتها 150 W وتبلغ كفاءة توليدها للضوء 10% (أى أن 10% فقط من القدرة المستهلكة هى التى تتحول إلى ضوء) . اذكر أية خطوات تقريبية تقوم بها وناقش مدى صلاحيتها .

▪ 32 وجد أن شدة الضوء المقاسة عند نقطة تبعد 2.0 m عن مصدر ضوئى شديد ودقيق الحجم هى $2.2\ W/m^2$. فما هى الشدة الصادرة عن نفس المصدر إذا قيست على بعد مقداره 5.0 m ؟

مسائل إضافية

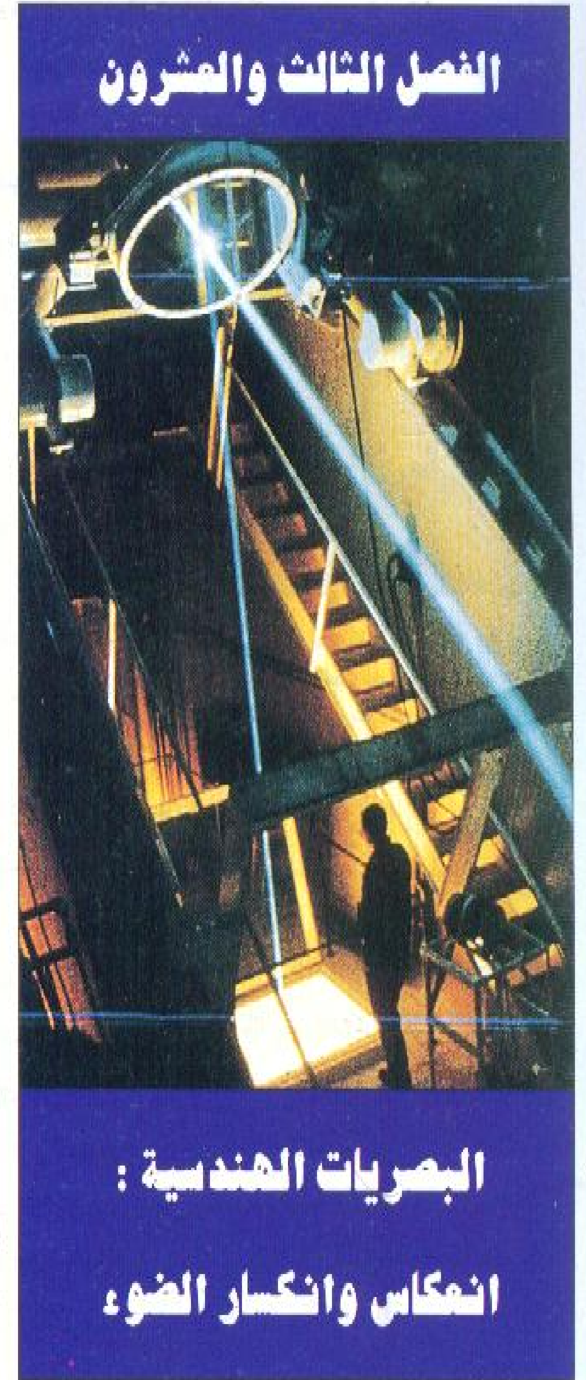
▪ 33 احسب متوسط القدرة التى يشعها بانتظام فى جميع الاتجاهات مصدر ما ، إذا كانت سعة المجال المغناطيسى هى $6 \times 10^{-8}\ T$ عند نقطة على بعد 3 m من المصدر .

▪ 34 تبث محطة إذاعة بانتظام فى جميع الاتجاهات بقدرة متوسطها 18 kW . احسب القيمة القصوى للمجال الكهربى عند (أ) 1 km ، (ب) 5 km ؛ (جـ) 25 km من جهاز الإرسال .

▪ 35 يبث جهاز إرسال موجات كهرومغناطيسية بانتظام فى جميع الاتجاهات بقدرة قيمتها 80 W . وقد وجد أن القيمة القصوى للمجال الكهربى عند نقطة بعيدة ، والناجمة عن هذا المصدر هى 16 mV/m . فكم يبعد جهاز الإرسال عن هذه النقطة ؟

▪ 36 يستخدم فى منزل ما هوائى طبقى قطره 22 m لاستقبال إشارات تليفزيونية مبثوثة من محطة تليفزيونية بعيدة . اعتبر أن الإشارة التليفزيونية هى موجة جيبية متصلة ومنفردة . والمجال الكهربى بها سعته $E_0 = 0.1\ mV/m$ ، وأن الهوائى يمتص كل الإشعاع الواقع على الطبق الدائرى . (أ) ما هى سعة المجال المغناطيسى فى الموجة ؟ (ب) احسب شدة الإشعاع و (جـ) القدرة ، اللتين يستقبلهما الهوائى .

الفصل الثالث والعشرون



البصريات الهندسية : انعكاس وانكسار الضوء

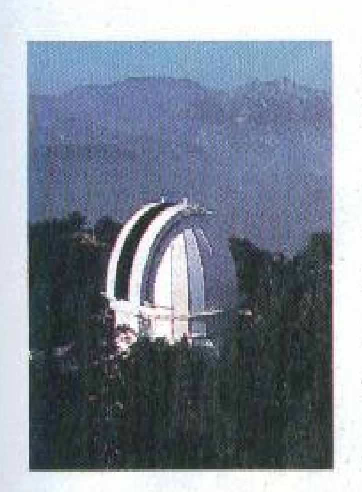
سينصب اهتمامنا فى هذا الفصل والفصلين التاليين له ، بشكل أساسى على جزء صغير جدًا ـ وإن كان مهمًا للغاية ـ من الطيف الكهرومغناطيسى : ونعنى به تلك المنطقة من الطيف ذات الأطوال الموجية حيث العين البشرية حساسة لها . ويشار إلى هذه المنطقة باسم **الضوء المرئى** أو مجرد الضوء . وعلى الرغم من أن اهتمامنا الأساسى منصب على الضوء المرئى إلا أن كثيرًا مما سندرسه قابل للتطبيق على الإشعاع الكهرومغناطيسى كله .

23-1 مفهوم الضوء

يمدنا الإبصار ـ من بين كل الحواس ـ بمعلومات أكثر مما تفعل كل الحواس الأخرى مجتمعة سواء من حيث كميتها أو تفاصيلها . ويعتمد ما نراه ـ أساسًا ـ على خواص الضوء ، كما يعتمد على العمليات الفيزيائية والنفسية لتفسيره . فلا غرابة إذن فى أن طبيعة الضوء ظلت دائمًا موضوعًا لكثير من التأمل والاهتمام . وعلى الرغم من هذا الاهتمام الكبير والمحاولات العديدة للتفسير إلا أن السؤال حول ماهية الضوء ظل محل جدل حتى العقد الأول من القرن العشرين . وقد أوردنا جانبًا من التفاصيل المميزة

للبحث التاريخي عن فهم حقيقي للضوء في المقال الخاص « بالخلافات في الفيزياء » في الفصل الثاني والعشرين . وسوف نذكر هنا قليلاً من العلاقات البارزة عندما نفحص ما نعرفه الآن حول خواص الضوء .

لقد تركز الجدل في عصر نيوتن حول السؤال عما إذا كان الضوء مكونًا من تيار من الجسيمات أو « الكريات » ، أو أنه ظاهرة موجية من نوع ما . وقد مال نيوتن إلى فكرة الجسيمات . وكانت مكانته العلمية سببًا في اقتناع الكثيرين برأيه . ثم قدم توماس يونج عام 1803 نتائج تجربة ظهر فيها أن الضوء المنبعث من مصدرين يكوّن أشكال تداخل تماثل تلك التي يمكن أن تحدث من تراكب موجتين . وسوف نشرح تجربة يونج بالتفصيل في الفصل الرابع والعشرين . ثم قيست في نفس الوقت تقريبًا سرعة الضوء المار في الماء ووجد أنها أقل من سرعة الضوء في الهواء . وحيث أن نظرية الجسيمات لنيوتن قد نصت على أن الضوء لابد أن يسير بسرعة أكبر في الماء ، فقد كان هذا دليلاً ثانيًا يناقض تلك النظرية . وهكذا صارت النظرية الموجية هي التفسير السائد للضوء ، ثم زودت بالأساس الرياضي الدقيق في ستينيات القرن التاسع عشر عن طريق العمل المتميز لماكسويل (الفصل الثاني والعشرون) .



جبال سان جابرييل (ويرى جبل ويلسون في المقدمة) ، حيث أجرى مايكلسون أكثر قياساته دقة لسرعة الضوء في العشرينيات من القرن العشرين .

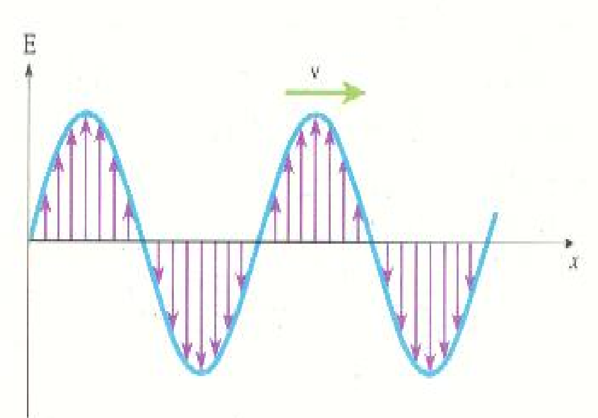
ولنا أن نعتقد أنه بحلول العام 1900 فإن الطبيعة الموجية للضوء لابد وأن تكون قد أصبحت مفهومة جيدًا ، بل ومقبولة على نطاق واسع . إلا أن تفاعل الضوء مع المادة ؛ من حيث كيفية انبعاثه وكيفية امتصاصه ؛ قد ظل أمرًا محيرًا . ولم يكن ممكنًا تفسير طيف الضوء المنبعث من الأجسام الساخنة (إشعاع الجسم الأسود) ، وكذلك المنبعث من ذرات بسيطة مثل الهيدروجين ، في ضوء النظرية الموجية بشكل كافٍ وقد فُسرت الظاهرة المعروفة **بالأثر الكهروضوئي** ، حيث تتطاير الإلكترونات من الأسطح الفلزية التي يسقط عليها الضوء ، بشكل ناجح عام 1905 على يدى أينشتين ، عندما استخدم فكرة أن الضوء يتفاعل مع الإلكترونات كما لو كان مكونًا من تيار من الجسيمات وقد وصلنا إلى هدنة مشوبة بالحذر ـ عندما ظهرت نظرية الكم خلال القرن العشرين ـ مع فكرة إنه تحت ظروف معينة يسلك الضوء سلوك الموجة ، بينما يسلك تحت ظروف أخرى سلوك تيار من الجسيمات التي لا كتلة لها تدعى **الفوتونات** . وسوف نتناول هذه الطبيعة المزدوجة للضوء بصورة أكمل في الفصل السادس والعشرين . أما بالنسبة للفصول القليلة القادمة ، فسوف نركز على جوانب الضوء التي يمكن فهمها من خواص الموجات الكهرومغناطيسية المميزة .



شكل 1-23: التناظر بين الأطوال الموجية والألوان الموضحة هنا تقريبية فقط . والألوان مثل الأزرق المخضر والبرتقالي تحتل مناطق متوسطة (انظر أيضًا الشكل 8-22) .

الموجات الضوئية هي موجات كهرومغناطيسية ذات مجال كهربي مهتز يتعامد مع مجال مغناطيسي مهتز ويتفق معه في الطور ، كما سبق وأشرنا في الفصل السابق . وتقع الأطوال الموجية للضوء المرئي في المدى من 400 إلى 700 nm (الشكل 1-23) . ويمكننا باستخدام المعادلة (1-22) ملاحظة أن هذا المدى من الأطوال الموجية ينتمي إلى مدى الترددات من 4.3×10^{14} إلى 7.5×10^{14} Hz . ويوضح الشكل 2-23 المجال الكهربي في موجة تنتشر في اتجاه المحور x . ويلاحظ أن المجال المهتز E متعامد مع

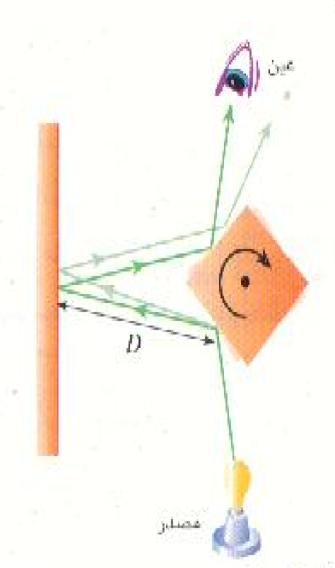
المحور x . ومن ثم تكون **الموجات الضوئية** ، **موجات مستعرضة** ، حيث أن اهتزازات الموجة متعامدة مع اتجاه الانتشار . وهكذا فلهذه الموجات كثير من الخواص المشتركة مع موجات مستعرضة أخرى مثل الموجات التى تتكون بالأوتار أو الموجات المتكونة على سطح الماء . ومن أكثر الأدلة المباشرة على أن الضوء عبارة عن موجات مستعرضة هى إمكانية **استقطابه** . فالموجات المستعرضة فقط هى التى لها هذه الخاصية . وسوف نتناول استقطاب الضوء فى الفصل الرابع والعشرين .



شكل 2-23:
يتذبذب المجال الكهربى فى موجة كهرومغناطيسية عموديًا على اتجاه الانتشار ، ولذلك تعتبر الموجة مستعرضة .

23-2 سرعة الضوء

لابد إنك تذكر من القسم 1-2 ، أن سرعة الضوء فى الفراغ تعرف بوحدات SI على أن قيمتها الدقيقة هى $c = 299,792,458$ m/s وهو ما نقربه عادة إلى الرقم 3.0×10^8 m/s . وقد اختير هذا التعريف ليتفق مع القيمة المقاسة لسرعة الضوء بدلالة المتر . المعرَّف فى القسم 1-2 . وقد جرت محاولات كثيرة لقياس c قبل الاتفاق على هذا المعيار . فقد كان جاليليو واحدًا من الأوائل الذين حاولوا ذلك ، وقد فشل فى ذلك ولكنه استنتج فقط أن انتقال الضوء « إن لم يكن لحظيًا فهو سريع للغاية » . ثم ظهرت أول نتيجة كمية عام 1675 عندما استخدم الفلكى الدانماركى رومر الحركة النسبية بين الأرض وأحد أقمار كوكب المشترى ، حيث استنتج أن الضوء ينتقل بسرعة 2.1×10^8 m/s تقريبًا . ويعزى معظم الخطأ فى قياسات رومر إلى القيمة غير الصحيحة لنصف قطر مدار الأرض . أما فى عام 1849 فقد قاس الفيزيائى الفرنسى فيزو الزمن الذى يستغرقه الضوء للانتقال بين جبلين جيئة وذهابًا وكانت المسافة بين الجبلين 8.6 km . وكانت قيمة c كما أعطتها تجارب فيزو هى $c = 3.1 \times 10^8$ m/s .



شكل 3-23:
رسم مبسط لتجربة مايكلسون لقياس سرعة الضوء وإذا أدير المكعب المفضض بالسرعة المناسبة تمامًا فإن الشعاع سينعكس إلى عين المشاهد . وتكون المسافة D فى الواقع أكبر بكثير عما هو مبين بالشكل .

إن أول قياسات عالية الدقة هى ما قام بها الأمريكى أ. أ. مايكلسون فى عشرينيات القرن العشرين ، إذ قاس مايكلسون زمن الرحلة التى يقطعها شعاع ضوئى جيئة وذهابًا بين جبل سان أنطونيو (ويسمى الآن جبل بالدى) وجبل ويلسون الذى يبعد عنه 70 km . وكلاهما يقع فى كاليفورنيا . واستخدم مايكلسون جهازًا يوضح الشكل 3-23 رسمًا مبسطًا له . ينعكس شعاع ضوئى منبعث من المصدر من على أحد جوانب مكعب فضضت أربع أسطح منه . ثم ينعكس كما هو موضح بالشكل . فإذا كان المكعب فى الوضع الصحيح

تمامًا فإن الشعاع سيصل إلى عين المشاهد فى الوضع المبين بالشكل .

افترض الآن أن المكعب أدير حول محور يمر بمركزه ويتعامد مع الصفحة . وعندما يحتل المكعب الموضع المبين بالخطوط الثقيلة كما فى الشكل 3-23 فإن الشعاع ينعكس نحو المرآة كما هو مبين . وبمرور الوقت فإن الشعاع سيعود إلى المكعب قادمًا من المرآة ، إلا أن المكعب سيكون قد غادر الموقع الأول ودار حول نفسه إلى موضع كالمبين بالخطوط الخفيفة ، أى أن الشعاع لن ينعكس نحو عين المشاهد . أما إذا أريد للشعاع أن يصل إلى عين المشاهد فلابد أن يكون المكعب قد أدير ربع دورة تمام خلال الزمن الذى يستغرقه الشعاع لكى يصل إلى المرآة ويرتد منها ، إذ أنه تحت هذا الشرط فقط سيكون المكعب مرة أخرى فى الوضع الموضح بالخطوط الثقيلة كما فى الشكل 3-23 ، وعندئذ يقوم المكعب بعكس الشعاع إلى العين .

ويتلخص أسلوب القياس فى تغيير سرعة دوران المكعب إلى أن يدخل الشعاع المنعكس إلى العين . وعند هذه القيمة لسرعة الدوران ، فإننا نعلم أن الزمن الذى تستغرقه 1/4 دورة مساوٍ للزمن الذى يستغرقه الضوء لكى يقطع مسافة مقدارها $2\ D$. من الضرورى إذن أن نعرف فقط سرعة دوران الكعب والمسافة D حتى نتمكن من حساب سرعة الضوء . وقد أثبتت تجربة مايكلسون أن سرعة الضوء هى 2.99796×10^8 m/s .

لقد أجريت التجارب التى قررت القيمة الحالية لسرعة الضوء c فى بداية السبعينيات من القرن العشرين ، باستخدام قياسات الطول الموجى والتردد للضوء المنبعث بالليزر . وستظل هذه القياسات هى أكثر ما أجرى من القياسات دقة بالنسبة لأى ثابت فيزيائى .

وينتقل الضوء بأقصى سرعة له خلال الفراغ ، بمعنى أن سرعته خلال المواد الأخرى أقل دائمًا من c . وعلاوة على ذلك فسرعته خلال المواد المختلفة - فيما عدا الفراغ - تعتمد على الطول الموجى للضوء وعلى المادة نفسها كذلك . ويوضح الجدول 1-23 قائمة بقيم سرعة الضوء فى المواد المختلفة .

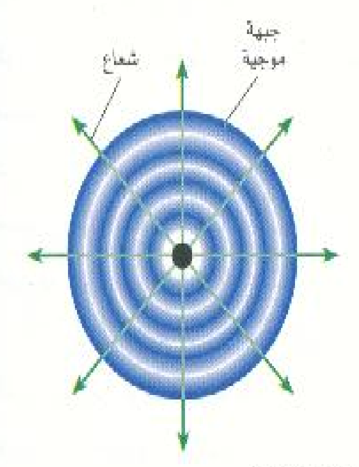
جدول 1-23:
سرعة الضوء عند الطول الموجى 589 nm



المادة	السرعة (10^8 m/s)
الفراغ	2.99792
الهواء	2.9970
الماء	2.25
إيثانول	2.20
بنزين	2.00
زجاج كراون	1.97
بولى ستيرين	1.89
زجاج فلنت	1.81
الماس	1.24

3-23 انعكاس الضوء

عندما يلقى حجر فى بركة ماء ، فإن مجموعة من الموجات الدائرية أو **الجبهات الموجية** ، تتحرك منطلقة من النقطة التى ارتطم فيها الحجر بالماء ، وتنتقل الموجة المبينة فى الشكل 4-23 ، فى اتجاه أنصاف الأقطار نحو الخارج بدءًا من المركز . وتسمى الأسهم المرسومة فى الاتجاه الذى تتحرك فيه الجبهات الموجية ، **أشعة** . ويلاحظ أن الأشعة دائمًا متعامدة على الجبهات الموجية كما تعلمنا بالفعل فى القسم 1-15 . ونستطيع من ثم أن نصف حركة الموجة وذلك برسم أى من الأشعة أو الجبهات الموجية . ولكل من الطريقتين قيمتها .



شكل 4-23:
تتعامد الأشعة مع الجبهات الموجية وهى تدل على اتجاه انتشار الموجة .

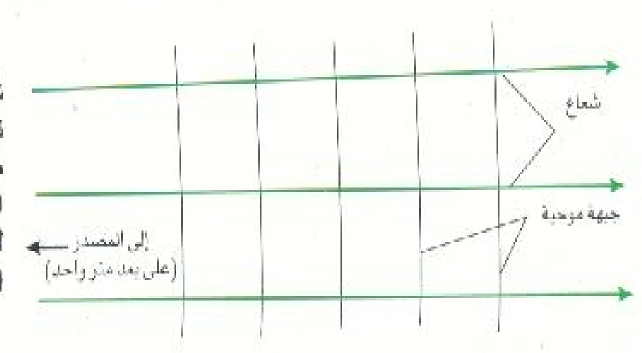
ونلاحظ من الشكل 5-23 كيف يبدو شكل الجبهات الموجية والأشعة عند نقطة بعيدة عن المصدر . والجبهات الموجية قطاعات من الدوائر التى أنصاف أقطارها تساوى 1 m ، مشيرة بذلك إلى أن المصدر يبعد 1 m . كما يلاحظ أن الجبهات الموجية تمثلها

خطوط مستقيمة تقريبًا والأشعة تكاد تكون موازيـة لبعضـها البعض وفي حالة الأبعاد الثلاثة فإن الجبهات الموجية مستوية تقريبًا . ومن ثم فبالنسبة لمصـدر بعيد ، يشار إلى مثل هذه الموجات على أنها **موجات مستوية** . ومصطلح **الضوء المتوازى** الذى يصف شكل الأشعة ؛ مرادف لمصطلح **الموجات المستوية** الذى يشير إلى شكل جبهة الموجة .

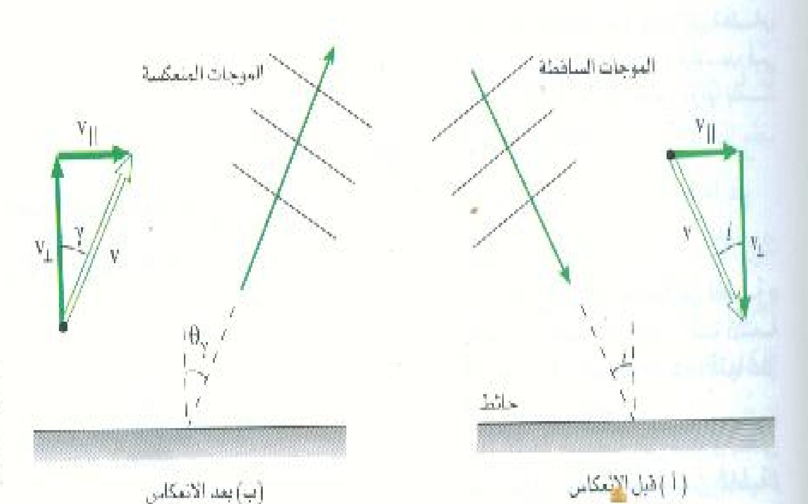
افترض أن موجات مائية مستوية تسقط على حائط مسطح كما يبين الشكل 6-23 (أ) ويمكن تحليل سرعة الموجة القادمـة إلى مركبتين ، إحداهما $v_\perp$ متعامدة على الحائط والأخرى $v_\parallel$ موازية له . وعند الارتطام بالحائط فإن $v_\perp$ تعكس اتجاهها بينما يظل اتجاه $v_\parallel$ بدون تغيير . ونتيجة لهذا تنعكس الموجة من السطح . ويوضح الشكل 6-23 (ب) الشعاع المنعكس ومركبتى سرعته . وسنحاول الآن معرفة العلاقة بين زاوية السقوط θ_i المبينة فى الجزء (أ) وزاوية الانعكاس θ_r المبينة فى الجزء (ب) .

وكما هو مبين فإن $\cos\theta_i = v_\perp/v$ (الشكل 6-23 (أ)) و $\cos\theta_r = v_\perp/v$ (الشكل 6-23 (ب)) . ومن ثم ، وحيث أن جيبى التمام (cos) متساويان ، فإن زاوية السقوط تساوى زاوية الانعكاس .

وهذه الحقيقة التى تنطوى على انعكاس موجة الماء بحيث تكون زاوية السقوط مساوية لزاوية الانعكاس ، صالحة بشكل عام ؛ بحيث يمكننا استخدام نفس الاستدلال لإثبات أن الموجات الضوئية تنعكس هى الأخرى بنفس الطريقة . ويلاحظ فقط أن الفرض الأساسى الذى طرح هو أنه عند الانعكاس ، تنعكس مركبة السرعة المتعامدة على السطح ؛ فى حين أن المركبة الموازية للسطح لا تتغير . وهذه النتيجة حقيقية لأى نوع من الموجات



شكل 5-23:
تكون الأشعة الصادرة من مصدر بعيد متوازية تقريبًا ، كما يلاحظ أن الجبهات الموجية مستوية تقريبًا . وبالنسبة لجسم لانهائى البعد فإن الموجات تعتبر استوائية (مستوية) وتعتبر الأشعة متوازية .



شكل 6-23:
تنعكس الموجة الساقطة بحيث أن زاوية السقوط i تساوى زاوية الانعكاس r .

يتحقق بشأنها هذا الفرض . وقد أثبتت القياسات المتعلقة بالضوء وأشكال أخرى للإشعاع الكهرومغناطيسي صحة هذا الاستنتاج وعلى ذلك يمكننا صياغة القاعدة الآتية المعروفة باسم **قانون الانعكاس** .

زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس .

ويسمى ذلل النوع من الانعكاس المبين في الشكل 7-23 (أ) ، حيث يكون السطح العاكس أملس تمامًا كما في حالة المرآة : **انعكاسًا مرآويًا** . أما الأسطح الخشنة مثل الورق أو الجدران المطلية فإنها تؤدي إلى **انعكاس انتشاري** كالمبين في الشكل 7-23 (ب) . وعلى الرغم من أن قانون الانعكاس ينطبق بالنسبة لهذه الأسطح على أشعة منفردة في الحزمة الضوئية إلا أن الأسطح غير الملساء تجعل الأشعة تنعكس بزوايا مختلفة من على المستوى المتوسط للسطح .



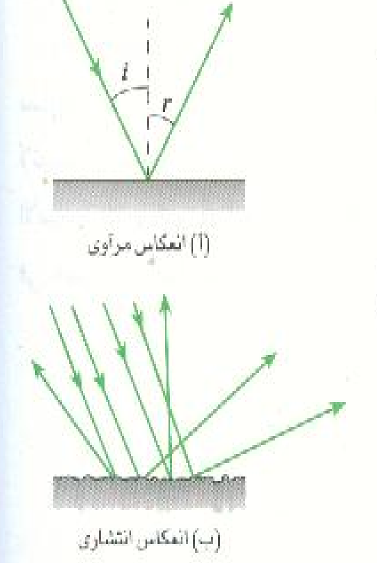
عند وضع جسم ما أو أجسام بين مرآتين مستويتين تواجه كل منهما الأخرى فإن صورًا متعددة تتكون .

23-4 المرايا المستوية

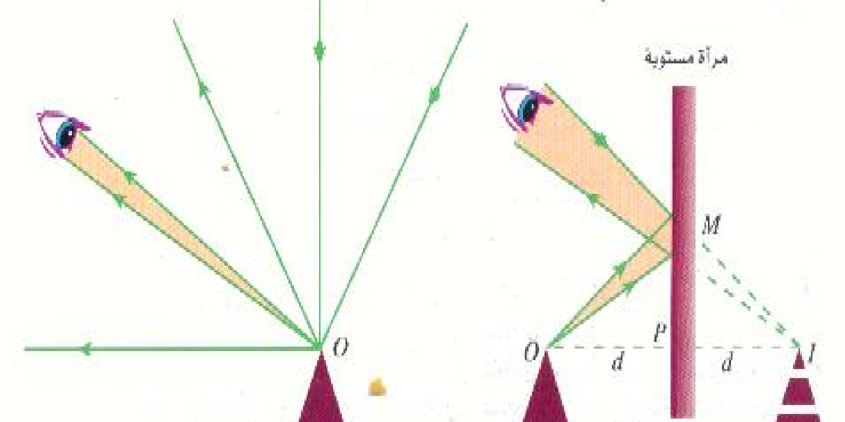
سنقوم الآن بتطبيق ما عرفنا منذ قليل حول الانعكاس على الموضوع المهم الخاص بتكون الصور بواسطة المرايا . وسنتناول أولاً كيف تقوم مرآة مستوية (أي مرآة مسطحة) بتكوين صورة ما .

كلما نظرت إلى نفسك في المرآة كل يوم ، فإنك ترى صورة وجهك أمامك . فإذا ما توقفت لتفحص بدقة ما تراه فإنك ستدرك كما لو كانت صورتك موجودة خلف سطح المرآة . وفي الحقيقة فإن الصورة تبدو كما لو كانت تقع على نفس المسافة خلف المرآة كالتي يبعد عنها وجهك أمام المرآة . دعنا الآن نفحص مثل هذا الانعكاس لكي نفهم بوضوح كيفية رؤية الصورة هكذا .

هب أنك قد وضعت جسمًا ما أمام مرآة ، وأنك ترغب في معرفة الموقع الذي تحس به عينك لصورة الجسم . إن كل نقطة من نقط الجسم تعمل كمصدر نقطي للضوء ، وهذه المصادر إما أنها تبعث الضوء أو تعكسه في شكل أشعة متفرقة . وعندما ننظر مباشرة إلى طرف الجسم ، كما هو مبين في الشكل 8-23 (أ) ، فإن ما تراه ، سيكون كسرًا



شكل 7-23:
زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس بالنسبة لكل شعاع في حزمة ضوئية ويعكس السطح المنبسط كل الأشعة بحيث تكون متوازية معًا مما يؤدي إلى انعكاس مرآوي . أما السطح الخشن فيتسبب في انتشار الأشعة عند الانعكاس مؤديًا بذلك إلى انعكاس انتشاري .



شكل 8-23:
(أ) تتفرق الأشعة المنبعثة من نقطة o للجسم في جميع الاتجاهات . أما الأشعة المحصورة في المسافة الصفراء فإنها تدخل العين ويمكن رؤيتها .
(ب) الأشعة المنعكسة التي ترى بالعين تبدو كما لو كانت قادمة من النقطة I الواقعة على صورة الجسم o .

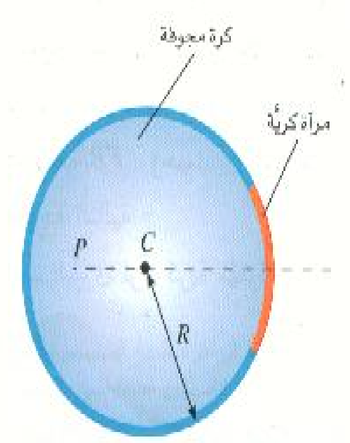
صغيرًا فقط من الضوء الذى يتفرق من تلك النقطة والذى يدخل إلى حدقة عينك . أما حين تنظر إلى نفس أحزمة الأشعة الضوئية عند انعكاسها بواسطة المرآة ، كما فى الشكل 8-23 (ب) فإن عقلك سيفسر هذه الأشعة كما لو كانت قادمة فى خطوط مستقيمة من نقطة تقع خلف المرآة . وهذه النقطة المبينة فى الشكل 8-23 (ب) هى ما نسميه صورة طرف الجسم . ويمكنك اختيار أية نقطة أخرى من نقط الجسم وترسم مسارًا مماثلاً للأشعة . **إن كل نقطة من نقط الجسم لها صورة نقطة مناظرة خلف المرآة** ، وهى النقطة التى تنطلق منها الأشعة التى تغادر نقطة الجسم وتبدو كما لو أنها قادمة بعد انعكاسها بالمرآة . وقد شئنا ألا نرسم الأشعة القادمة من نقط أخرى للجسم وذلك من أجل وضوح الصورة ، ولكن عليك إدراك أن الأشعة المنعكسة معًا على كل النقط الواقعة على الجسم هى التى تُكوِّن الصورة الكاملة .

وعند تطبيق قانون الانعكاس على الأشعة فى الشكل 8-23 (ب) ، فإنه يصبح من السهل إثبات أن المثلثين OMP و IMP متطابقان ، بحيث تكون النقط المتناظرة للجسم والصورة ، واقعة على مسافات متساوية أمام وخلف المرآة .

ويسمى هذا النوع من الصور ، والذى لا تخترق فيه الأشعة المرئية جسم المرآة **صورًا تقديرية أو صورًا تخيلية** . وبعبارة أخرى ، فإن الأشعة التى تصل إلى العين لا تأتى حقيقة من النقطة التى نرى عندها الصورة . وليست هناك إمكانية بالمرة بحيث يمكن إظهار الصورة على صفحة من ورق موضوعة عند النقطة I خلف المرآة . إنما هو العقل الذى يفسر أن الضوء قادم بالفعل من النقطة I . ويظل حقيقيًا دائمًا أن صورة الجسم المرئية بالانعكاس من مرآة مستوية هى صورة تقديرية . وتكون الصورة دائمًا على بعد خلف المرآة مساوٍ لبعد الجسم أمامها .

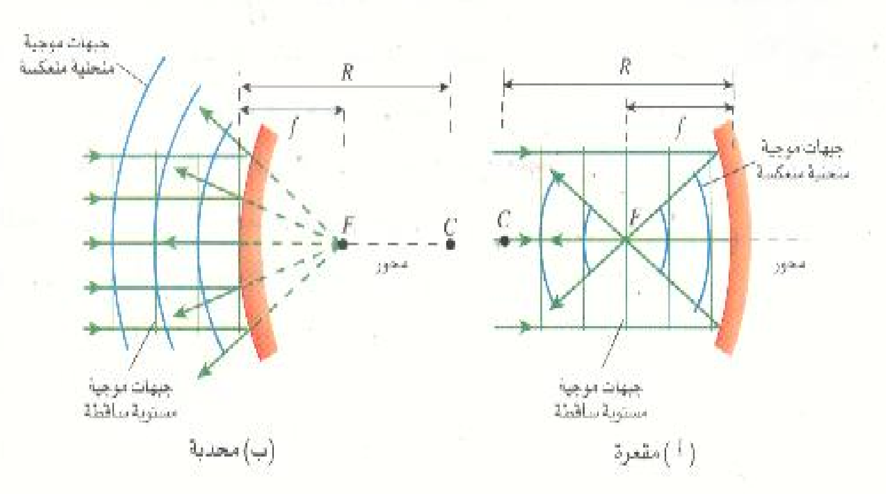
23-5 البعد البؤرى لمرآة كرية

المرايا المستوية هى التى نستخدمها جميعًا ، أما المرايا الكرية فليست شائعة الاستعمال . إلا أن المرايا المستخدمة أثناء التجميل أو الحلاقة ، عبارة عن أجزاء من سطح كرة مجوفة ، كما يبين الشكل 9-23 . ويسمى الخط PA الذى يخترق مركز الكرة ويتعامد مع سطحها **المحور الرئيسى للمرآة** . وعندما ينعكس الضوء من السطح الداخلى للكرة كما فى الشكل 10-23 (أ) فإن المرآة تسمى مرآة **مقعرة** ؛ أما إذا انعكس من على سطح الكرة الخارجى كما فى الشكل 10-23 (ب) فإن المرآة تكون مرآة **محدبة** .



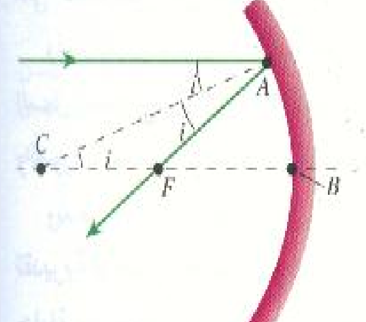
شكل 9-23:
المرآة الكرية هى كرة مجوفة . ونصف قطر المرآة هو R ومركز انحنائها هو النقطة c . أما محورها الرئيسى فهو الخط PA . ويمر المحور الرئيسى خلال مركز الانحناء والنقطة المركزية على سطح المرآة .

وقد اعتبرنا فى الرسم المبين فى الشكل 10-23 أن الضوء قادم من مصدر بعيد بحيث تكون الأشعة القادمة متوازية والجبهات الموجية ممثلة بمستويات . وكما هو مبين فى الجزء (أ) فإن الأشعة المتوازية التى تنتقل باتجاه المحور الرئيسى لمرآة مقعرة ، تنعكس كلها نحو نقطة واحدة هى F . (هذا الأمر صحيح بالتقريب فقط كما سنرى لاحقًا) . وتسمى النقطة التى ينعكس إليها الضوء القادم من نقطة بعيدة بواسطة مرآة مقعرة **بؤرة** (**أو النقطة البؤرية**) المرآة . ويوضح الشكل 10-23 (ب) ما يحدث للأشعة



شكل 10–23:
(أ) يتجمع الضوء المنعكس للأشعة المتوازية الساقطة على مرآة مقعرة عند البؤرة F أمام المرآة ، (ب) أما الأشعة المتوازية الساقطة فتنعكس من على مرآة محدبة بحيث تبدو متفرقة من نقطة البؤرة F خلف المرآة .

المتوازية عندما تنعكس من مرآة محدبة . إن الأشعة المنعكسة تبدو كما لو كانت آتية من نقطة F تقع **خلف** المرآة . وهذه النقطة هي بؤرة المرآة المحدبة (أو نقطة البؤرة بالنسبة لها) والمسافة الواقعة بين النقطة المركزية للمرآة ونقطة البؤرة F في كلٍ من النوعين - تسمى **البعد البؤرى f** للمرآة .



شكل 11–23:
ينعكس الشعاع القريب من المحور الرئيسى والموازى له من مرآة مقعرة بحيث يمر خلال النقطة البؤرية .

سنفحص الآن ما يحدد البعد البؤرى لمرآة مقعرة . اعتبر شعاعًا ساقطًا (قادمًا) وموازيًا للمحور الرئيسى CB يرتطم بالمرآة عند النقطة A في الشكل 11–23 . الخط CA هو نصف قطر المرآة ولذا فهو متعامد على سطح المرآة عند A . ونذكر من القسم 3–22 أن قانون الانعكاس قد تم تعريفه بدلالة الزاوية المحصورة بين الشعاع الساقط والعمود المقام على السطح العاكس . ولهذا فإن الشعاع المنعكس الذى يغادر النقطة A في الشكل 11–23 بزاوية مقدارها θ_i مع الخط CA يقطع المحور الأساسى عند النقطة البؤرية F . وحيث أن الشعاع الساقط كان موازيًا للمحور الرئيسى CB ، فإن الزاوية ACB لابد وأن تكون مساوي للزاوية θ_i . ومعنى هذا أن المثلث CFA متساوى الساقين ، بحيث تتساوى المسافتان CF و FA . فإذا كان الشعاع الساقط ليس بعيدًا جدًا عن المحور الرئيسى ، بحيث تقع النقطة A بالقرب من B فإن FA (ومن ثم CF) يساويان بالتقريب FB . وحيث أن $CF + FB = R$ هو نصف قطر الكرة ، فإننا نحصل على النتيجة التالية :

البعد البؤرى لمرآة كرية مقعرة هو نصف نصف قطر انحناء المرآة :

$$FB = f = \frac{R}{2} \qquad (23\text{–}1)$$

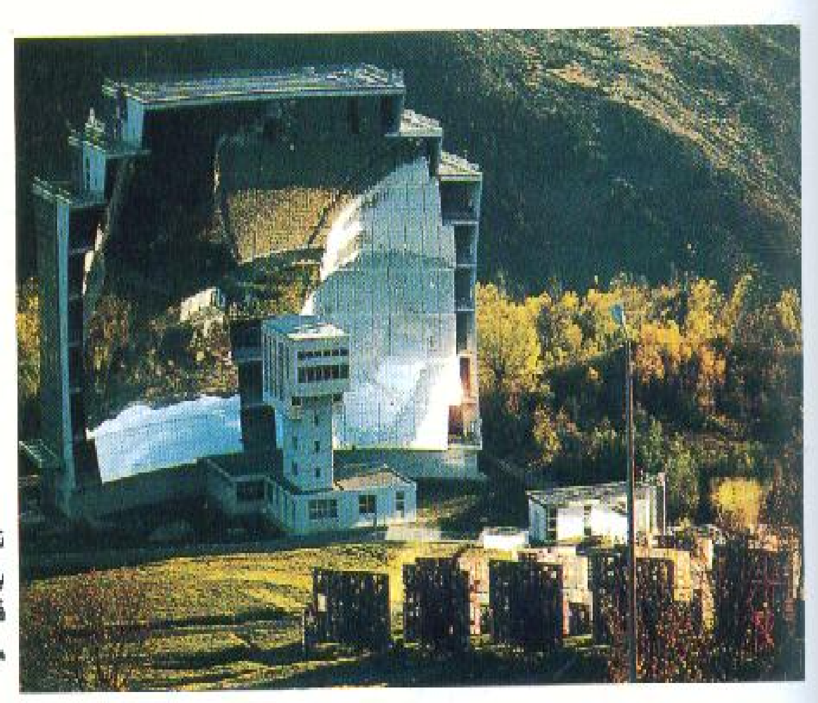
على أنه ليس صحيحًا تمامًا أن كل الأشعة الموازية للمحور الرئيسى تنعكس لكى تمر خلال نفس النقطة F . وكنوع من التدريب يمكنك أن ترسم حالة مثل ذلك الشعاع الذى ينعكس من نقطة تبعد كثيرًا عن المحور الرئيسى وتثبت أنه لا ينعكس خلال F . على أننا إذا قصرنا الأشعة الساقطة على ذلك الجزء من المرآة حيث القوس AB أصغر بكثير من نصف قطر الكرة فإن ما نجريه من تقريب عند اشتقاق المعادلة 1–23 يكون جيدًا .

ويمكننا تحقيق ذلك إما باستخدام فتحة صغيرة في حائل يوضع أمام المرآة أو بجعل المرآة نفسها صغيرة بالمقارنة مع نصف قطر انحنائها . ويطلق مصطلح **الزيغ الكرى** على العيب الذى يحدث عندما لا تمر الأشعة كلها بالبؤرة . وهناك مرايا ذات مقطع مستعرض على هيئة **قطع مكافئ** ولا يوجد بها هذا العيب . وصناعة هذه المرايا أكثر تكلفة من المرايا الكرية ، وإن كان استعمالها شائعًا فى التلسكوبات الفلكية حيث تكون الفتحة العريضة مطلبًا أساسيًا .

23-6 رسم مسارات الأشعة ؛ تكوين الصور بواسطة مرايا كرية مقعرة

هناك ثلاثة أشعة ضوئية - من بين كل الأشعة الضوئية الممكنة - ذات فائدة خاصة فى تحديد موقع نقطة الصورة المناظرة . وهذه الأشعة هى التى ترسم انطلاقًا من نقطة الجسم إلى المرآة . ولقد تناولنا بالفعل أحد هذه الأشعة من قبل : وهو الشعاع الساقط الموازى للمحور الرئيسى والمار قريبًا منه . ونعلم أن هذا الشعاع ينعكس مارًا بالنقطة البؤرية F ، التى تقع عند منتصف المسافة بين مركز انحناء المرآة C والنقطة التى يلتقى فيها المحور الرئيسى بالمرآة . وهذا ما يوضحه الشكل 12-23 (أ) .

والشعاع المهم الثانى هو المار خلال النقطة البؤرية فى طريقه إلى المرآة وينعكس هذا الشعاع بحيث يكون موازيًا للمحور الرئيسى ؛ كما يرى فى الشكل 12-23 (ب) والسبب فى هذا هو أن قانون الانعكاس يظل قائمًا إذا عكسنا اتجاه الشعاع .



تعكس المرايا المقعرة أشعة الشمس فى بؤرة داخل هذا الفرن الشمسى جنوب فرنسا . وتصل درجة حرارة هذا الفرن إلى ما يزيد عن 4000°C عند بؤرة المرآة .

أما الشعاع الخاص الثالث فهو الذى يمر من الجسم خلال مركز انحناء المرآة عند C وكما يوضح الشكل 12-23 (جـ) فإنه يرتطم بالمرآة عموديًا على سطحها ثم ينعكس مرتدًا على نفسه . وفيما يلى تلخيص للأشعة الثلاثة الخاصة هذه بالنسبة للمرايا المقعرة :

1 ينعكس الشعاع الموازى للمحور الرئيسى بحيث يمر خلال البؤرة .

2 ينعكس الشعاع المار خلال البؤرة بحيث يكون موازيًا للمحور الرئيسى .

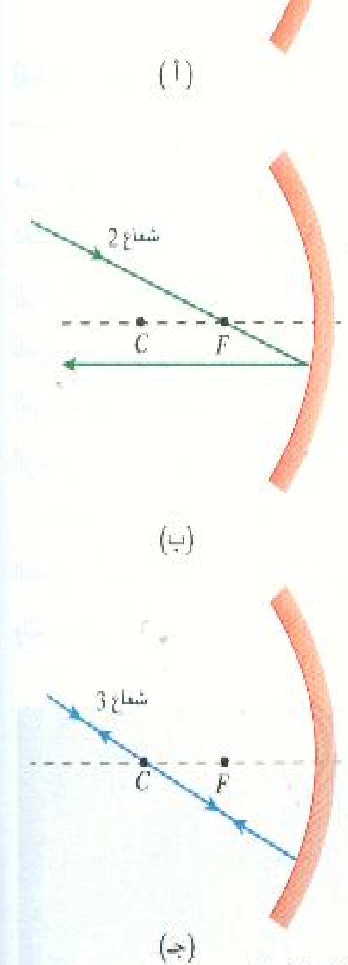
3 ينعكس الشعاع المار خلال مركز انحناء المرآة بحيث يرتد على نفسه ليمر خلال مركز انحناء المرآة .

سنقوم الآن بتطبيق هذه القواعد عند استعمال مسارات الأشعة التى تحدد موضع تكون الصور .

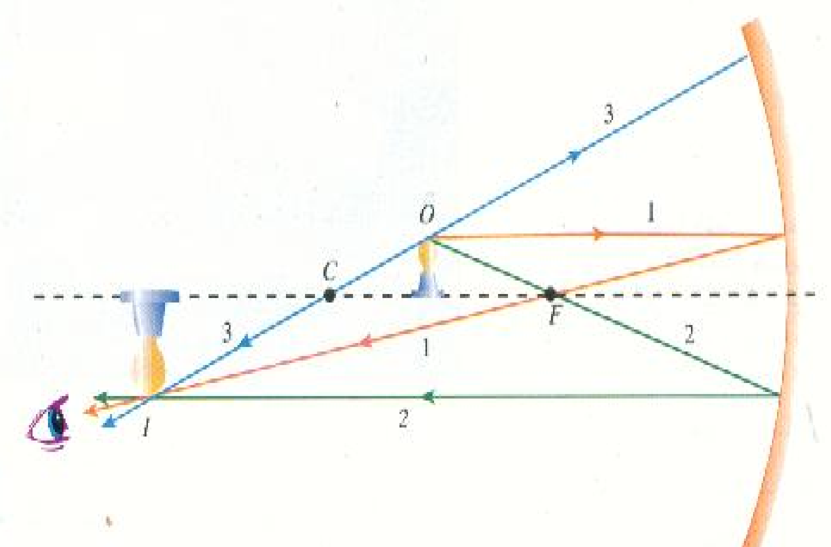
افترض الآن أننا نرغب فى إيجاد صورة الجسم O التى تكونها المرآة الموضحة فى الشكل 23-13 وليكن هذا الجسم عبارة عن بصيلة إضاءة . وإذا كانت البصيلة تشع الضوء فى جميع الاتجاهات ، فإننا لا نحتاج سوى لرسم ثلاثة أشعة منبعثة منها . وهذه الأشعة الثلاثة هى بالضبط تلك التى وصفناها منذ قليل بواسطة القواعد الثلاث وعليك تتبع كل منها لتتأكد من أنها رسمت بشكل صحيح فى الشكل 23-13 . وبمجرد تحديد مواضع C و F فإن مسطرة بسيطة تكفى لرسم الأشعة الثلاثة .

وإذا وضعت عينك فى الموقع المبين فى الشكل 23-13 فستبدو لك الأشعة الثلاثة وكأنها قادمة من النقطة I . وبعبارة أخرى ، فإنك ترى صورة البصيلة الضوئية عند النقطة I . وعلاوة على ذلك ، وحيث أن الأشعة تتجمع بالفعل على النقطة I ثم تخترقها ، فإنك إذا وضعت صفحة من الورق عند I لتكونت عليها صورة مضيئة للبصيلة الأصلية . وهذه إذن صورة حقيقية : **فى حالة الصورة الحقيقية فإن الضوء يمر حقيقة خلال الصورة مسترجعًا بذلك شكل الجسم** . ويلاحظ هنا كيف يختلف هذا الوضع عن الصورة التخيلية أو التقديرية التى التقينا بها فى حالة المرآة المستوية .

لقد استعملنا الأشعة الثلاثة الخاصة حتى نحدد موقع صورة النقطة I المناظرة للجسم عند النقطة O ، وتمثل كل النقط الأخرى الواقعة على الجسم مصادر إما للضوء المنبعث أو الضوء المنعكس . ولكى نجد نقط الصورة المناظرة للنقط الأخرى على الجسم فإننا نستطيع إجراء نفس الخطوات حتى نحصل فى النهاية على صورة الجسم بأكمله . فإذا



شكل 23-12:
الأشعة الخاصة الثلاثة المستخدمة فى تحديد موقع الصورة بواسطة مرآة كرية مقعرة .



شكل 23-13:
تتكون صورة حقيقية I للجسم O . تتبع الأشعة الثلاثة الصادرة من الجسم .

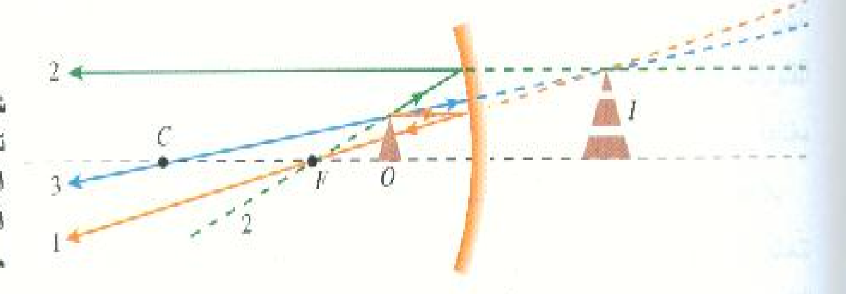
كان الجسم رأسيًا كما فى الشكل 13-23 ، فإننا نتوقع أن كل نقط الصورة سوف تقع على خط رأسى أيضًا وعلى هذا ، إذا تم تحديد موقع نقطة الصورة المناظرة لقمة الجسم ، لأمكن إكمال باقى الصورة .

ونستطيع استخدام مسارات الأشعة هذه للحصول على المزيد من المعلومات حول الصورة وليس مجرد موقعها . وعندما تتجمع الأشعة المنعكسة فيزيائيًا ، كما ذكرنا ، فإن الصورة تكون حقيقية . وإذا وضع حائل أو فيلم فوتوغرافى عند موضع تكون الصورة لاستطعنا تسجيل هذه الصورة الحقيقية . ويلاحظ أيضا أنه فى الشكل 13-23 تتقاطع كل الأشعة المنعكسة مع المحور الرئيسى قبل أن تتجمع لتكون الصورة ، وهذا ما يجعل الصورة تنقلب بالنسبة لجسم . وفى النهاية فإن رسم مسار الأشعة المبين فى الشكل 13-23 يوضح أن الصورة أكبر من الجسم ولذا يقال أن الصورة **مكبرة** ويمكنك بفحص الشكل 13-23 أن تدرك أن الجسم إذا وضع بين C و F فى أماكن مختلفة فإننا نحصل على نفس خصائص الصورة .

سندرس الآن الموقف إذا وضع الجسم عند نقطة أبعد من C ولتكن I مثلاً ، كما فى الشكل 13-23 . ومرة أخرى نستخدم الحقيقة القائلة بأن اتجاه الأشعة يمكن عكسه ، وعندئذ يمكن التحقق من أن الصورة سوف تتكون عند النقطة O . وهذه الصورة ستكون مرة أخرى حقيقية ومقلوبة ولكنها ستكون ذات حجم **أصغر** . ويمكن التحقق من أن خصائص الصورة هذه ستنتج عند أى وضع للجسم خارج النقطة C . والآن سنلخص خصائص الصورة هذه بالنسبة لمرآة مقعرة :

1 عند وضع الجسم بين C و F فإن الصورة تكون حقيقية ومقلوبة ومكبرة .
2 عند وضع الجسم أبعد من C فإن الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغرة .

لنفحص الآن الموقف المبين فى الشكل 14-23 ، حيث يوجد الجسم قريبًا جدًا من المرآة ، أدنى من النقطة F . ومرة أخرى سنقوم برسم الأشعة الثلاثة من طرف الجسم العلوى . على أن الشعاع 2 لن يمر الآن بالنقطة F وهو فى طريقه إلى المرآة وذلك لأن النقطة O أدنى إلى المرآة من النقطة البؤرية F . إن الشعاع لا يزال ينتقل على امتداد الخط المار عبر F ثم ينعكس موازيًا للمحور الرئيسى كالسابق . نتيجة انعكاس الأشعة الثلاثة مختلفة تمامًا عن ذى قبل ، فكما يوضح الشكل 14-23 فإن الأشعة المنعكسة تتفرق كلها عن بعضها البعض . ولن تتجمع مطلقا فى نقطة لكى تكون صورة حقيقية كما حدث فى



شكل 14-23:
تبدو الأشعة الثلاثة كما لو كانت صادرة عن الصورة التقديرية I . يلاحظ بشكل خاص الشعاعان 2 و 3 حتى يمكن رسمهما فى حالات أخرى .




صورة مكونة بواسطة مرايا مقعرة ومحدبة . يلاحظ أن الصورة المبينة فى (أ) مقلوبة بينما الصورة فى (ب) معتدلة . أى الصورتين تقديرية وأيها حقيقية ؟ هل يمكن بواسطة المرآة المقعرة تكوين صورة معتدلة للدمية ؟ وهل يمكن بواسطة المرآة المحدبة تكوين صورة مقلوبة ؟

الشكل 13–23 . على أن أسلوب تفرقها يبدو **كما لو** أنها صدرت مباشرة من نقطة I خلف المرآة . وكما رأينا فى حالة المرآة المستوية فإن شكل الأشعة يمثل ما نطلق عليه صورة تقديرية ويلاحظ أن رسم مسار الأشعة يبين أن الصورة ستكون معتدلة ومكبرة ويمكننا إضافة هذه النتيجة إلى الخاصيتين السابقتين للصورة التى تكونها المرآة المقعرة :

3 إذا وضع الجسم على مسافة أقرب من F فإن الصورة تكون تقديرية ، ومعتدلة ومكبرة .

23-7 معادلة المرآة

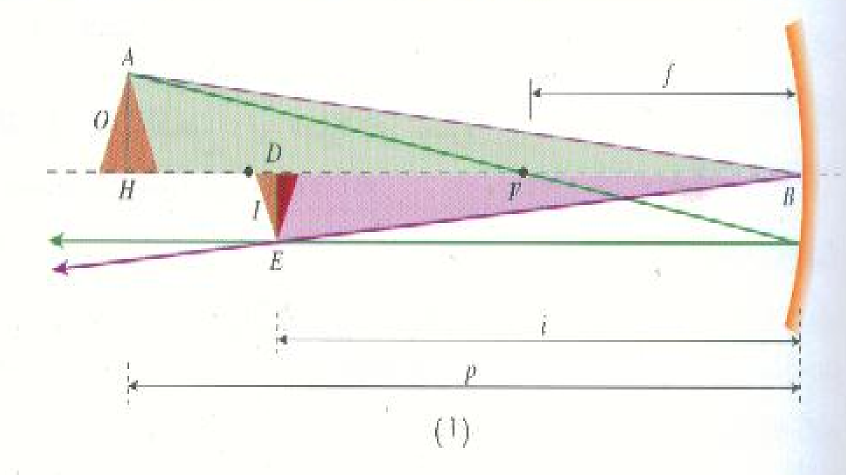
سنرجع إلى الشكل 15–23 لكى نشتق معادلة رياضية تصف موقع الصورة . تسمى المسافة p بين الجسم والمرآة **بعد الجسم** . ويسمى ارتفاع الجسم O . أما ارتفاع الصورة فيسمى I ، والمسافة بين الصورة والمرآة **بعد الصورة** ورمزه i . ويلاحظ أن المسافة BF بين المرآة والنقطة البؤرية هى البعد البؤرى f للمرآة . وليس الشعاع ABE فى الجزء (أ) من الشكل واحدًا من الأشعة الثلاثة الخاصة . على أنه ينعكس بحيث تكون الزاوية ABH مساوية للزاوية DBE . ولهذا السبب فإن المثلثين المظللين ABH و DBE فى الجزء (أ) متشابهان . ولذلك فإن النسبة بين الأضلاع المتناظرة هى :

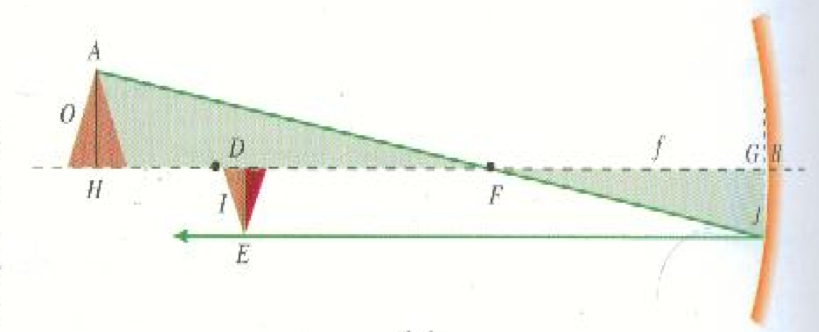
$$\frac{O}{I} = \frac{p}{i}$$

كما أن المثلثين المظللين فى الشكل 15–23 (ب) هما أيضا متشابهان . والمسافتان AH و DE هما ارتفاعا الجسم والصورة على الترتيب .

ويلاحظ أيضًا أن $DE = GJ$. ومن ثم ،

$$\frac{O}{I} = \frac{AH}{DE} = \frac{AH}{GJ} = \frac{HF}{FG}$$





شكل 15-23:
(أ) المثلثان ABH و DBE متشابهان .
(ب) والمثلثان AFH و JFG متشابهان . وقد اعتبرنا – في النص – أن انحناء المرآة صغير جدًا لدرجة يمكن معها إهمال المسافة GB .

ولكن HF هي بالضبط $p-f$ و FG هي تقريبًا f . (الفرق بينهما مسافة ضئيلة GB) .
وفي ظل هذا التقريب فإن :

$$\frac{O}{I}=\frac{p-f}{f}$$

وبمساواة هذا المقدار بما وجدناه في الجزء (أ) فإن :

$$\frac{p}{i}=\frac{p-f}{f}$$

وبقسمة طرفي المعادلة على p وإعادة ترتيب الحدود فإن :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f}=\frac{2}{R} \qquad (23\text{-}2)$$

حيث وضعنا $f = R/2$ من المعادلة (1-23) .

تسمى المعادلة 2-23 **معادلة المرآة** ، وهي تتيح لنا حساب المسافة i وهي بعد الصورة عن المرآة وذلك إذا عرف كل من بعد الجسم p عن المرآة والبعد البؤرى f . ومن ناحية أخرى فهذه المعادلة تتيح أيضًا معرفة الموقع الذى يجب وضع جسم ما فيه حتى تكون صورة فى موقع محدد . ويلاحظ فى هذه المعادلة أنها تتضمن جمع **مقادير المقلوبات** . وكما سنرى فإن f و p و i يمكن أن تتخذ قيمًا سالبة أو موجبة فى مواقف مختلفة ، ولذا لابد من توخي العناية عند تطبيق القواعد الجبرية بشكل صحيح .

يلاحظ أنه لحساب الارتفاعات النسبية للجسم والصورة فإن العلاقة $O/I = p/i$ تتحقق كما سبق وبينا . ويطلق على النسبة بين ارتفاع الصورة وارتفاع الجسم مصطلح التكبير الذى تحدثه المرآة :

$$\text{التكبير} = M = \frac{I}{O} = \frac{i}{p} \qquad (23\text{-}3)$$

وكما رأينا من قبل إن كانت I/O أقل من الواحد الصحيح ، فإن الصورة تكون مصغرة . أما إن كانت I/O أكبر من الواحد الصحيح فإن الصورة تكون مكبرة .

مثال 23-1

وضع جسم ارتفاعه 2.0 cm على بعد 30 cm من مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 10 cm . أوجد موقع وحجم الصورة . وهل الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟ حقيقية أم تقديرية ؟

استدلال منطقي :

سؤال : كيف يعتمد موقع الصورة على المقادير المعروفة p ، O ، R ؟

الإجابة : تعين R البعد البؤرى f (المعادلة 3-23) . ومن ثم تستطيع حل معادلة المرآة (المعادلة 2-23) لتحصل على i .

سؤال : كيف يتحدد حجم الصورة من موقع الصورة ؟

الإجابة : تبين المعادلة 3-23 أن النسبة بين المسافتين i/p هى نفس النسبة بين الحجمين I/O .

سؤال : وكيف يمكننى تحديد ما إذا كانت الصورة أولا ، معتدلة أم مقلوبة وثانيًا إذا كانت حقيقة أم تقديرية ؟

الإجابة : إن الجسم موجود خارج النقطة C وهو الوضع الثانى من الأوضاع الثلاثة الواردة فى القسم 6-23 الذى يلخص خصائص الصورة المشتقة من رسم مسار الأشعة .

الحل والمناقشة : البعد البؤرى للمرآة هو $f = R/2 = 5.0\ \text{cm}$. وعلى ذلك يكون بعد الصورة هو :

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{5.0\ \text{cm}} - \frac{1}{30\ \text{cm}} = \frac{5}{30\ \text{cm}}$$

وبأخذ مقلوب هذه الكمية فإن :

$$i = \frac{30\ \text{cm}}{5} = 6.0\ \text{cm}$$

ويلاحظ أننا لسنا بحاجة للتحويل إلى أمتار طالما كانت كل المسافات تتخذ نفس الوحدات والتكبير هو

$$M = \frac{i}{p} = \frac{6.0\ \text{cm}}{30\ \text{cm}} = \frac{1}{5}$$

أى أن الصورة قد صغرت إلى خمس حجم الجسم . ولهذا فإن $I = O/5 = \frac{2}{5}\ \text{cm}$.

ويمكنك التأكد من هذا الحل بسرعة إذا رسمت مسار الأشعة .

يبين القسم 6-23 أن الأجسام الموضوعة خارج النقطة C (أبعد منها) تتكون لها صور حقيقية ومقلوبة ومصغرة .

مثال 2-23

وضع جسم على بعد 5.0 cm أمام مرآة مقعرة بعدها البؤرى 10 cm . أوجد موضع الصورة وخصائصها .

استدلال منطقى :

1

سؤال : لقد وضع الجسم على مسافة أقل من البعد البؤرى للمرآة . وأعلم من الشكل 14-23 أن مسار الأشعة لهذه الحالة يؤدى إلى تكون صورة تقديرية . فهل تنطبق معادلة المرآة على هذه الحالة ؟

الإجابة : نعم . تأكد من أنك تتناول العلاقات الجبرية بشكل صحيح . وعندئذ ستدرك كيف تظهر الصورة التقديرية فى الإجابة . ومعادلة المرآة فى هذه الحالة هى :

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{(10\ \text{cm})} - \frac{1}{(5.0\ \text{cm})}$$

الحل والمناقشة : تؤدى معادلة المرآة إلى نتيجة سالبة للبعد i

$$\frac{1}{i} = \frac{1-2}{10\ \text{cm}} = \frac{-1}{10\ \text{cm}} \qquad ; \qquad i = -10\ \text{cm}$$

ولهذا يمكننا تحديد نوع الصورة من الإشارة الجبرية للبعد i ، **فإذا كان i موجبًا ، فإن الصورة تكون حقيقية وتقع أمام المرآة . أما إذا كان i سالبًا فالصورة تقديرية وتقع خلف المرآة .**

إن خصائص الصورة لجسم موضوع أقرب من F (القسم 6-23) هى : تقديرية ، معتدلة ، ومكبرة . ويكون التكبير هو : $\frac{I}{O} = \frac{i}{p} = \frac{-10\ \text{cm}}{5.0\ \text{cm}} = -2.0$. ومعنى الإشارة السالبة سيناقش فى القسم التالى . أما الآن فإن هذه النتيجة تدل ببساطة على أن الصورة تبلغ ضعف ارتفاع الجسم .

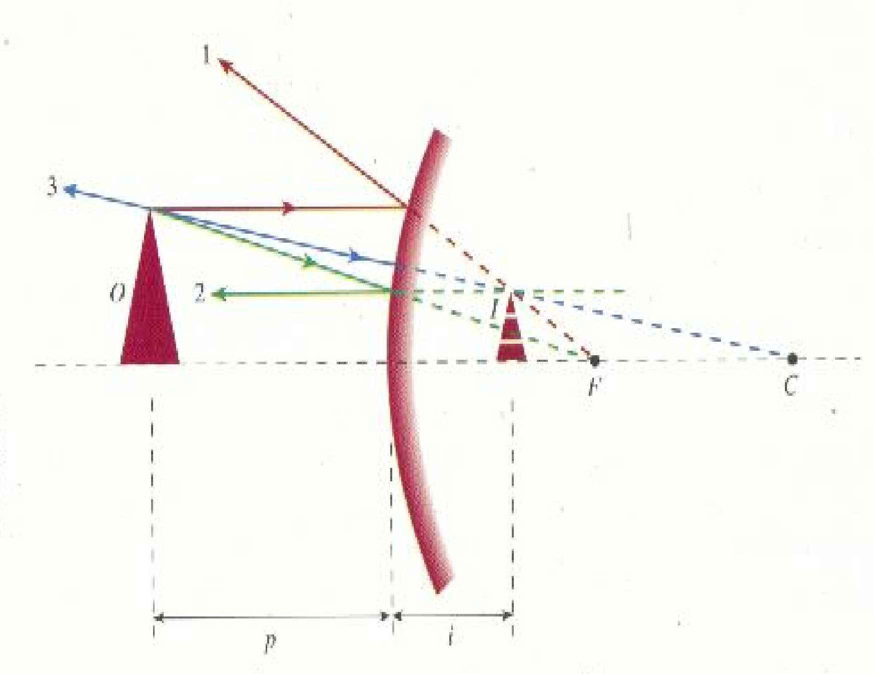
8-23 تكوين الصور بالمرايا المحدبة

المرآة الكرية المحدبة هى جزء من كرة ، يعكس الأشعة من السطح الخارجى كما هو موضح فى الشكل 10-23 (ب) ، حيث نرى كيف تنعكس الأشعة المتوازية من على تلك المرآة . وتبدو الأشعة كما لو كانت متفرقة من نقطة تقع خلف المرآة . **تنعكس الأشعة الساقطة على مرآة محدبة وموازية لمحورها الرئيسى ، كما لو كانت قادمة من النقطة البؤرية** . ولكى نبرهن على ذلك فإننا نسلك نفس الطريق كما فعلنا مع المرآة المقعرة .

بالرجوع إلى الشكل 16-23 فإننا نلاحظ من قانون الانعكاس ومن هندسة الشكل أن عدة زوايا متساوية فيما بينها . والمثلث AFC متساوى الساقين وهكذا فإن $AF = FC$ ، فإذا كان الضلع AB صغيرًا بالمقارنة مع نصف قطر انحناء المرآة فإن AF يساوى

بالتقريب BF . ومن ثم يكون BF مساويًا تقريبًا FC وهنا أيضًا يكون البعد البؤرى فى منتصف المسافة بين المرآة ومركز انحنائها .

شكل 16–23:
ينعكس الشعاع الساقط موازيًا للمحور كما لو كان قادمًا من النقطة البؤرية للمرآة المحدبة .



شكل 17–23:
إن عليك أن تكون قادرًا على رسم الأشعة الثلاثة فى أية حالة بها مرآة محدبة .

نستطيع بناء على ذلك ـ أن نكتب القواعد اللازمة لرسم الأشعة الثلاثة الخاصة بالنسبة **لمرآة محدبة** :

1 ينعكس الشعاع الموازى للمحور كما لو كان قادمًا من النقطة البؤرية (أو البؤرة)
2 ينعكس الشعاع المتجه نحو البؤرة موازيًا للمحور .
3 ينعكس الشعاع المتجه نحو مركز انحناء المرآة مرتدًا على نفسه .

ويوضح الشكل 17–23 هذه الأشعة الثلاثة وعليك تتبعها لتتأكد من أنها تتفق مع هذه القواعد . يلاحظ أن الأشعة الثلاثة المنعكسة تبدو كما لو كانت قادمة من الصورة I خلف المرآة . وكما نرى فالصورة تقديرية ، معتدلة ومصغرة .

إذا رجعنا إلى الشكل 18–23 لاستطعنا أن نحصل على العلاقات الجبرية المستخدمة فى تحديد موقع الصورة بالنسبة للمرآة المحدبة . وعليك إثبات أن المثلث ABH يشبه المثلث EBD فى الجزء (أ) . وأن المثلث IFG يشبه المثلث EFD فى الجزء (ب) . فإذا ثبت أن

هذا صحيح لأمكننا أن نوجد المعادلات التالية مثلما حدث فى معادلة المرآة المقعرة :

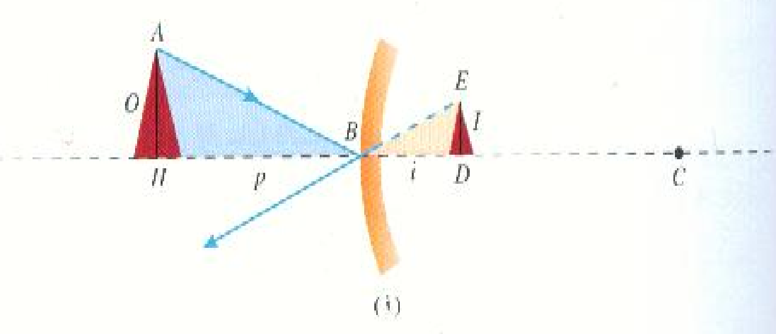
$$\frac{O}{I}=\frac{f}{f-i} \quad \text{و} \quad \frac{O}{I}=\frac{p}{i}$$

وقد اعتبرنا المسافة BG مهملة جدًا لصغرها ، عند كتابة هذه المعادلات .

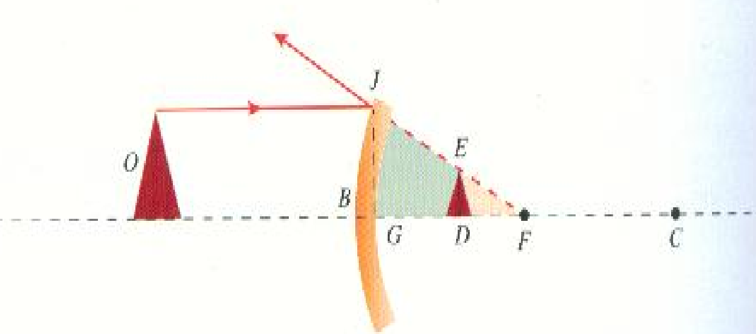
بمساواة هاتين المعادلتين وأخذ المقلوب ثم القسمة على i وإعادة ترتيب الحدود نحصل على ما يلى :

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{i}=-\frac{1}{f}$$

يلاحظ أنه ـ بغض النظر عن الإشارات ـ فالمعادلة هى نفسها المعادلة 2-23 للمرآة المقعرة وينبهنا اختلاف الإشارات إلى حقيقة أن الصورة فى هذه الحالة تقع خلف المرآة ، وليس أمامها . وإضافة إلى ذلك فإن الحد المشتمل على البعد البؤرى السالب هو نتيجة إلى أن المرآة محدبة ليست مقعرة .



(أ)



شكل 18-23:
المثلثان ABH و EBD متشابهان وكذلك المثلثان EFD و JGF وقد افترضنا أن المسافة FG مساوية بالضرورة للمسافة FB .

يمكننا أن نضع قواعد تسمح لنا باستخدام المعادلة 2-23 بالنسبة للمرايا المحدبة أيضًا ، بدلاً من تذكر معادلتى المرآتين . وإذا اتفقنا على أن نجعل بعد الصورة الواقعة خلف المرآة ، أى بعد الصورة التقديرية ، سالبًا دائمًا ، لأمكننا أن نحذف الإشارة السالبة من الحد المشتمل على i فى معادلة المرآة المحدبة . وعلاوة على ذلك ، إذا جعلنا البعد البؤرى للمرآة المحدبة سالبًا دائمًا لأمكننا أن نحذف الإشارة السالبة الأخرى أيضًا . ونستطيع ـ من ثم ـ أن نكتب ما يلى **لجميع** المرايا :

$$\frac{1}{p}=\frac{1}{i}=\frac{1}{f} \quad \text{للمرايا} \qquad (23\text{-}2)$$

حيث تم الاتفاق على :

1 يكون بعد الجسم موجبًا إذا وقع الجسم أمام المرآة وسالبًا فى أى وضع آخر .

2 يكون بعد الصورة موجبًا إذا وقعت الصورة أمام المرآة (صورة حقيقية) وسالبًا فيما عدا ذلك (صورة تقديرية) .

3 يكون البعد البؤرى موجبًا بالنسبة لمرآة مقعرة وسالبًا لمرآة محدبة .

ونستطيع أن نتوسع فى استخدام قاعدة الإشارات لتحديد ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة بالنسبة للجسم . وسنكتب معادلة التكبير بإشارة سالبة :

$$M = -\frac{i}{p} \qquad \text{(23-3) (أ)}$$

وليس للإشارة الاختيارية التى وضعناها أمام التكبير أى علاقة بالأحجام النسبية للجسم والصورة ، وإن كنا نستطيع أن نستخدمها لتحدد لنا ما إذا كانت الصورة معتدلة أو مقلوبة . ونلاحظ من الأمثلة السابقة أنه عندما تكون الصورة حقيقية فإنها تكون مقلوبة أيضًا ويكون بعد الصورة i موجبًا . وبما أن كلاً من p و i موجبان فإن النسبة $M = -i/p$ تكون سالبة . أما إذا كانت الصورة تقديرية فإنها تكون معتدلة ويكون البعد i سالبًا وهذا يجعل النسبة $M = -i/p$ موجبة . دعنا الآن نلخص هذه المعلومة فيما يلى :

إذا كان التكبير موجبًا فالصورة معتدلة بالنسبة للجسم ، وإذا كان M سالبًا فالصورة مقلوبة .

ويمكنك ملاحظة أنه من المهم جدًا - من المعادلتين 2-23 و 3-23 (أ) - أن نستخدم الإشارات الصحيحة . ومن المهم أيضًا وبنفس الدرجة أن نفسر معنى الإشارات التى تظهر فى نتائج الحسابات .

مثال 3-23

استخدمت مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 100 cm لكى تعكس الضوء الصادر من جسم موضوع على مسافة 75 cm أمام المرآة . أوجد موضع الصورة وتكبيرها . هل الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : لدينا $p = 75$ cm وإذا استطعت أن أعين البعد البؤرى للمرآة ، فيمكن باستخدام المعادلة 2-23 أن أجد i . فكيف إذن أعين f ؟

الإجابة : البعد البؤرى للمرآة هو نصف نصف قطر انحناء المرآة ، ولكن إذا كانت المرآة محدبة فإن $f = -50$ cm فى معادلة المرآة .

سؤال : ما هى المعادلة المستخدمة لإيجاد موضع الصورة ؟

الإجابة : $\frac{1}{i} = \frac{1}{(-50\text{ cm})} - \frac{1}{(75\text{ cm})}$. يلاحظ أن كلاً من الحدين سالب ولذا يكون (i) أيضًا سالبًا .

سؤال : إذا كان i قد أصبح معلومًا فكيف أعين التكبير وكيف أحدد ما إذا كانت

الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

الإجابة : نعلم من المعادلة 3-23 (أ) أن $M = -i/p$. وإذا حسبت M فإن قاعدة الإشارات بالنسبة له سوف تحدد لك ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة .

الحل والمناقشة : عند حل المعادلة 2-23 لإيجاد i ، فإننا نلاحظ أن المقام المشترك هو 150 cm :

$$\frac{1}{i} = \frac{-3-2}{150\ \text{cm}} = \frac{-5}{150\ \text{cm}}$$

ومنها نجد أن $i = -30$ cm . وتدل الإشارة السالبة على أن الصورة تقديرية وتقع خلف المرآة . وتذكر أن موقع الصورة هذا هو الموقع الذى يبدو وكأن الأشعة تخرج منه متفرقة . والتكبير هو

$$M = -\frac{-30\ \text{cm}}{75\ \text{cm}} = +0.40$$

اى أن حجم الصورة هو 40 فى المائة من حجم الجسم ، وتحدد الإشارة الموجبة أن الصورة معتدلة .

مثال 4-23

هب أن لديك مرآة مقعرة بعدها البؤرى 40 cm . أين يمكنك وضع جسم ما لتحصل على صورة له على بعد 100 cm أمام المرآة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة التى تربط بين الكميات المعلومة وموقع الجسم ؟

الإجابة : إنها معادلة المرآة :

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{i}$$

سؤال : ما هى الإشارات الصحيحة الواجب استخدامها ؟

الإجابة : يكون f موجبًا دائمًا بالنسبة للمرآة المقعرة ، والصورة المتكونة أمام المرآة تكون حقيقية ويكون i موجبًا .

الحل والمناقشة :

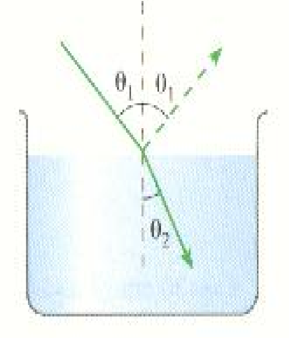
$$\frac{1}{p} = \frac{1}{40\ \text{cm}} - \frac{1}{100\ \text{cm}} = \frac{10-4}{400\ \text{cm}} = \frac{6}{400\ \text{cm}}$$

ويعطينا هذا $p = +66.7$ cm . وعليك التحقق من هذه النتيجة برسم مسار الأشعة .

تمرين : إذا كان طول الصورة 2.5 cm فما الطول الواجب أن يكون عليه الجسم .

الإجابة : 1.67 cm .

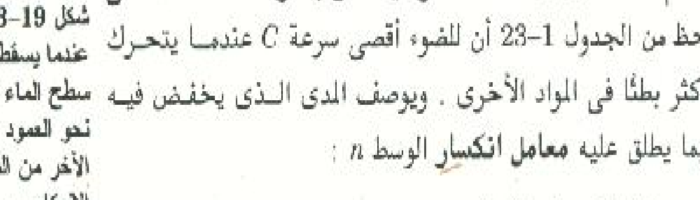
9-23 انكسار الضوء : قانون سنل



شكل 19-23:
عندما يسقط شعاع ضوئي في الهواء على سطح الماء فإن جزءًا من الشعاع ينكسر نحو العمود المقام على السطح . أما الجزء الآخر من الشعاع الساقط فيتبع قانون الانعكاس .

عندما تدخل حزمة من الضوء إلى الماء قادمة من الهواء فإن مسارها ينحني كما هو مبين في الشكل 19-23 . ويسمى التغير في اتجاه الشعاع عند مروره من وسط إلى آخر **انكسارًا** . والزاوية θ_1 هي بالطبع زاوية السقوط والزاوية θ_2 تسمى **زاوية الانكسار** . (ينعكس جزء أيضًا من الحزمة من على سطح الماء ، كما هو مبين بالشعاع المتقطع في الشكل 19-23 وإن كنا سنتجاهل هذا الانعكاس في القسم الحالي) .

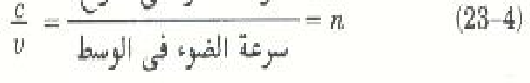
والسبب الأساسي وراء تغير اتجاه الشعاع عند انتقاله من وسط شفاف إلى وسط شفاف آخر هو كما ذكرنا في القسم 2-23 من **أن انتقال الضوء ينتقل بسرعات مختلفة في الأوساط المختلفة** . ونلاحظ من الجدول 1-23 أن للضوء أقصى سرعة C عندما يتحرك في الفراغ وأنه يتحرك أكثر بطئًا في المواد الأخرى . ويوصف المدى الذي يخفض فيه الوسط من سرعة الضوء بما يطلق عليه **معامل انكسار** الوسط n :



$$\frac{c}{v}=\frac{\text{سرعة الضوء في الفراغ}}{\text{سرعة الضوء في الوسط}}=n \qquad (23\text{-}4)$$



من مظاهر إدراك الانكسار أن أنبوبة الامتصاص تبدو وكأنها تنحني عندما تدخل في الماء .



الجدول 2-23 : معاملات الانكسار عند طول موجي مقداره 589 nm :

المادة	$c/v = n$	المادة	$c/v = n$
الهواء*	1.0003	زجاج كراون	1.52
الماء	1.33	كلوريد الصوديوم	1.53
إيثانول	1.36	بولي ستيرين	1.59
أسيتون	1.36	ثنائي كبريتيد الكربون	1.63
الكوارتز المنصهر	1.46	زجاج فلنت	1.66
البنزين	1.50	يوديد ميثيلين	1.74
اللوسيت أو البلكسيجلاس	1.51	الألماس	2.42

* عند معدل الضغط ودرجة الحرارة .

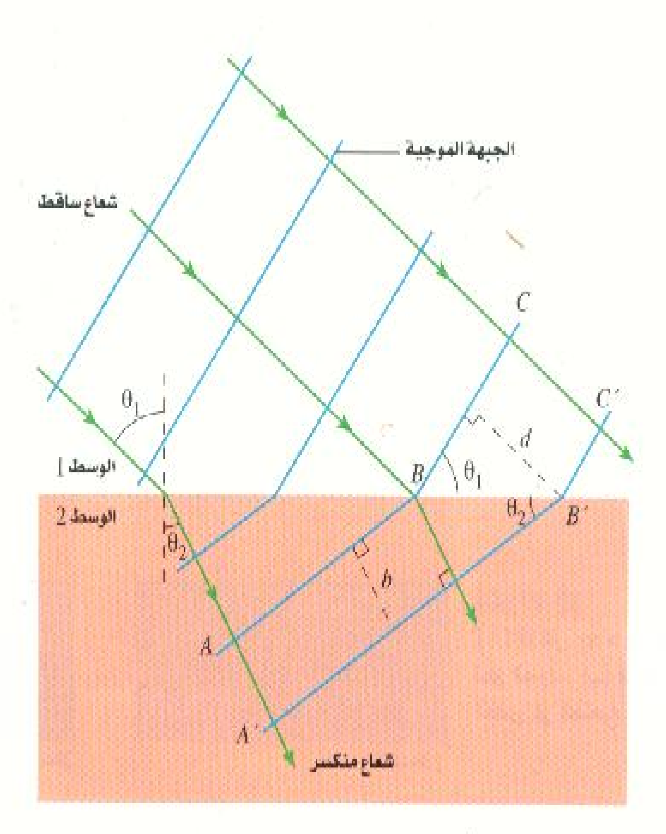
ومعامل الانكسار أكبر من الواحد دائمًا لأن الضوء يسير بأقصى سرعة في الفراغ ويحتوى الجدول 2-23 على قيم نموذجية لمعامل الانكسار n ، حيث يلاحظ أن معامل الانكسار يقترب من الواحد الصحيح بالنسبة للهواء في حين يكون معامل الانكسار كبيرًا بالنسبة للألماس وهو 2.42 . ومن الطبيعي أن معامل انكسار الفراغ هو واحد صحيح تمامًا ويتغير معامل الانكسار بشكل طفيف بتغير الطول الموجي للضوء كما سنرى فيما بعد وتكون قيمته أكبر للضوء الأزرق بالنسبة للقيمة عند الضوء الأحمر .

من المناسب دراسة حركة الجبهات الموجية لموجة مستوية كما هو مبين في الشكل 20-23 لكي نصل إلى علاقة بين زاوية السقوط θ_1 وزاوية الانكسار θ_2 . سنفترض أن سرعة الموجة v_1 في الوسط 1 ، و v_2 في الوسط 2 بحيث كانت v_1 أكبر من v_2 . وسيكون

للجبهات الموجية انحناءة عند السطح البينى للوسطين لأن الموجة تتحرك ببطء أكبر فى الوسط 2 عنها فى الوسط 1 .

افترض أنه يلزم وقت مقداره t لكى تنتقل جبهة الموجة ABC إلى الوضع $A'B'C'$ ولهذا فالمسافة التى تتحركها الجبهة الموجية فى الوسط 2 فى زمن مقداره t هو $b = v_2t$ والمسافة التى تتحركها الجبهة الموجية فى الوسط 1 هو $d = v_1t$. فإذا قسمنا d على b لوجدنا أن :

$$\frac{d}{b} = \frac{v_1}{v_2}$$



شكل 20-23:
بما أن الموجة تنتقل بشكل أبطأ فى الوسط 2 عنها فى الوسط 1 ، فإن المسافة AA' تكون أصغر من المسافة CC' .

ونلاحظ فى الشكل بالإضافة إلى ذلك أن :

$$\frac{d}{BB'} = \sin \theta_1 \quad \text{و} \quad \frac{d}{BB'} = \sin \theta_2$$

وإذا قسمنا إحدى المعادلتين على الأخرى نجد أن :

$$\frac{d}{b} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

وحيث أن $\frac{d}{b} = \frac{v_1}{v_2}$ ؛ إذن

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \qquad (23\text{-}5)$$

وقد عرفنا من تعريف معامل الانكسار أن $v = c/n$ ولذا يمكننا إعادة كتابة المعادلة (23-5) كالتالى :

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

ويمكن إعادة كتابة هذه المعادلة لتصبح

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (23\text{-}6)$$

وهو ما سنشير إليه بأنه **قانون سنل** . وهناك طريقة سهلة لتذكر قانون سنل وهي :

عندما يعبر الضوء الحدود بين وسط وآخر فإن حاصل الضرب $n \sin\theta$ يظل ثابتًا .

وعلينا تذكر أن زاويتي السقوط والانكسار تقاسان دائمًا بالنسبة **للعمود** المقام على الحد الفاصل بين الوسطين .

نستطيع من ملاحظة المعادلة 6-23 أنه لو كان n_2 أكبر من n_1 ، فإن $\sin\theta_1$ سيكون أكبر $\sin\theta_2$ مما يعني أن θ_1 أكبر من θ_2 . وهذه هي الحالة المبينة في الشكل 21-23 (أ) . إلا أنه قد يحدث أحيانًا أن نهتم بالحالة العكسية ، حيث n_2 أصغر من n_1 . وهي حالة حزمة ضوئية تنتقل من الزجاج إلى الهواء مثلاً ، وفي هذه الحالة فإن المعادلة 6-23 ستتنبأ لنا بأن θ_2 أكبر من θ_1 كما هو مبين في الشكل 21-23 (ب) .

شكل 21-23:
(أ) إذا كان $n_2 > n_1$ فإن الشعاع يميل نحو العمود . (ب) إذا كان $n_2 < n_1$ فإن العكس هو الصحيح .

إذا كان $n_2 > n_1$ فإن الشعاع ينحني نحو العمود ، أما إذا كان $n_2 < n_1$ فإن الشعاع يبتعد عن العمود .

علينا ملاحظة حالة خاصة مهمة تتعلق **بالسقوط العمودي** $(\theta_1 = 0)$ ، حيث يصبح حل المعادلة 6-23 في هذه الحالة هو $\theta_2 = 0$ بغض النظر عن قيم v_2 و v_1 التي لدينا وعموما فإن :

لا يغير الضوء الساقط عموديًا على السطح الفاصل بين وسط وآخر من اتجاهه عند دخوله إلى الوسط الثاني .

مثال توضيحي 1-23

يوجه أحد الغواصين شعاع ليزر من تحت الماء إلى أعلى بزاوية مقدارها °37 مع الاتجاه الرأسي . ما هي الزاوية التي يخرج بها الشعاع إلى الهواء ؟

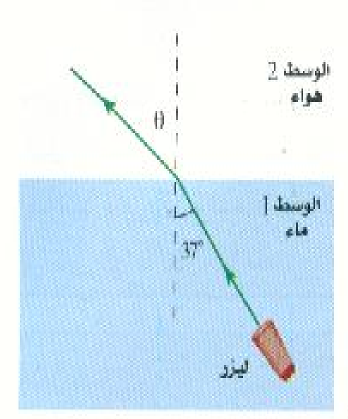
استدلال منطقى : يوضح الشكل 22-23 الحالة المذكورة . ويلاحظ أن الوسط 1 هو الماء والوسط 2 هو الهواء . بتطبيق قانون سنل ومعرفة $n_1 = 1.33$ و $n_2 = 1.00$ (من الجدول 2-23) ، فإن :

$$1.33 \sin 37^\circ = 1.00 \sin \theta$$

$$\sin \theta = 0.80$$

$$\theta = 53^\circ$$

تمرين : أوجد زاوية الانكسار فى الماء بالنسبة لضوء يدخل إلى الماء من الهواء بزاوية سقوط مقدارها 53° . **الإجابة :** 37° .

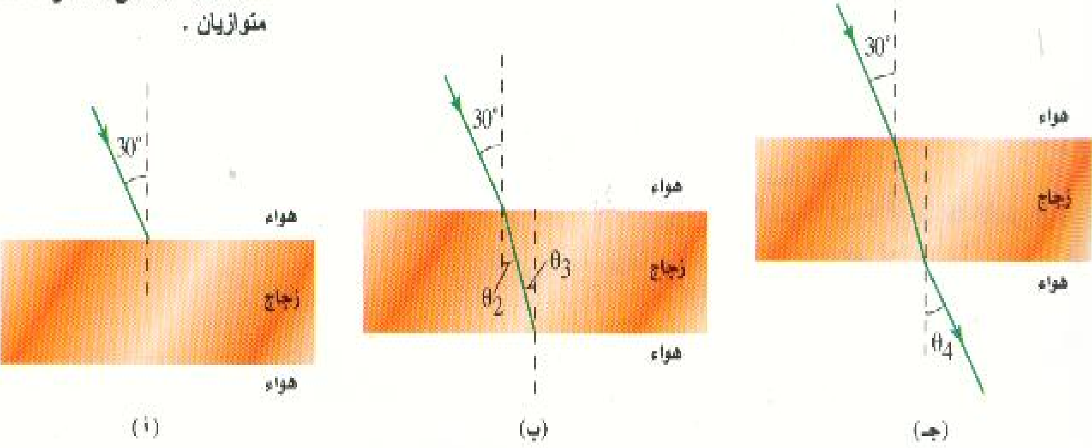


شكل 22-23:
يبعث الليزر الموجود تحت الماء شعاعًا ينحنى بعيدًا عن العمود عند خروجه إلى الهواء .

مثال 5-23 :

يسقط الضوء من الهواء بزاوية مقدارها 30° بالنسبة للعمود ، على شريحة من زجاج كراون لها سطحان متوازيان كما هو مبين فى الشكل 23-23 (أ) . ما هى زاوية خروج الضوء من السطح السفلى للزجاج إلى الهواء ؟

شكل 23-23:
ضوء يمر عبر لوح زجاجى له سطحان متوازيان .



استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الذى يحدد اتجاه الشعاع الخارج ؟

الإجابة : ينطبق قانون سنل على النقطة التى يخرج منها الشعاع عند السطح السفلى والشكل 23-23 (ب) تخطيط لمسار الشعاع أثناء اختراقه للزجاج وعليك إيجاد الزاوية θ_3 التى يسقط بها الضوء على السطح السفلى للشريحة .

سؤال : ما هى العلاقة بين θ_3 و θ_2 ؟

الإجابة : بما أن سطحى الشريحة متوازيان فإن $\theta_3 = \theta_2$.

سؤال : ما علاقة θ_2 بزاوية السقوط الأصلية ؟

الإجابة : من قانون سنل : $\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin 30^\circ$.

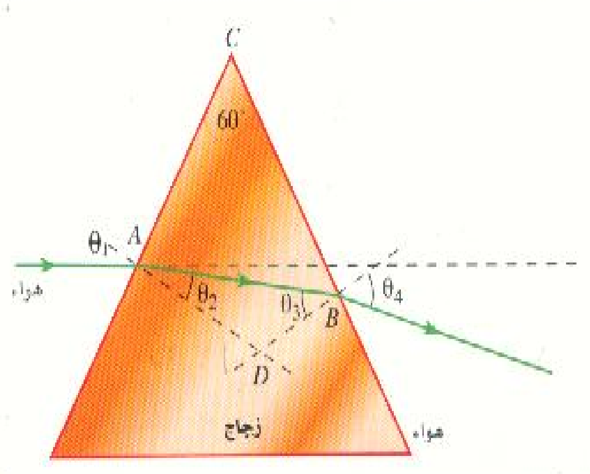
الحل والمناقشة : بأخذ كل العلاقات المذكورة فى الاعتبار نجد أن

$$\sin\theta_4 = \frac{n_2}{n_1}\sin\theta_3 = \frac{n_2}{n_1}\sin\theta_2 = \frac{n_2}{n_1}\times\frac{n_1}{n_2}\sin 30^\circ = \sin 30^\circ$$

وعلى هذا تكون $\theta_4 = 30^\circ$ مما يشير إلى أن الضوء يخرج من الزجـاج فـى نفـس الاتجـاه الذى دخل به . ويمكننا تعميم هذه النتيجة فى حالة أي عدد من الطبقات التى تحددها جـوانب متوازية . والشعاع يتحرك حـركة جانبية ولكنه لا يغـير اتجاهه عندما يعـود إلى نفس الوسط الذى بدأ منه .

مثال 6-23

يسقط الشعاع الموضح فى الشكل 24-23 على منشور متساوى الأضلاع وفى اتجاه يـوازى قاعدة المنشور المصنوع من كوارتز منصهر . أوجد الزاوية θ_4 التى يصنعها الشعاع الخارج مع العمود المقام على الوجه الأيمن للمنشور .



شكل 24-23:
ينحرف الضوء عن اتجاهه الأصلى بواسطة كل من وجهى المنشور .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى الزاوية التى ترتبط بها θ_4 من خلال قانون سنل ؟

الإجابة : يربط قانون سنل θ_4 مع θ_3 :

$$\sin\theta_4 = \frac{n_{air}}{n_{quartz}}\sin\theta_3$$

وتقاس كلتا الزاويتين بالنسبة للعمود المرسوم خلال النقطة B فى الشكل 24-23 .

سؤال : كيف يمكن إيجاد θ_3 ؟

الإجابة : عليك بتذكر بعض الـهندسة . أولاً ، مجموع زوايا المثلث 180° بحيث ،

$$\theta_4 + \theta_3 + D \text{ الزاوية} = 180^\circ$$

كما أن مجموع زوايا الشكل الرباعى (الذى تحدده أربعـة أضـلاع) هـو 360° وبـالنظر إلى الشكل الرباعى $ACBD$ نجد أن كلاً من الزاويتين A و B هو 90° أمـا الزاويـة C فـهى 60° من المعطيات . ولـهذا تصبح الزاوية $D = 120^\circ$. وبدمج هذه النتيجـة مـع المعادلـة السابقة نصل إلى العلاقة بين θ_2 و θ_3 :

$$\theta_2 + \theta_3 = 180° - 120° = 60°$$

سؤال : ما الذى يحدد θ_2 ؟

الإجابة : نطبق قانون سنل على النقطة A فنحصل على θ_2 إذا كانت θ_1 معروفة وحيث أن كل زاوية من زوايا المنشور 60° والشعاع الساقط يوازى القاعدة فلابد إنك تستطيع استنتاج أن $\theta_1 = 30°$.

الحل والمناقشة : سنحصل أولاً على n_{quartz} من الجدول 2-23 ، وإذا بدأنا بالزاوية θ_1 نحصل على θ_2 :

$$\sin \theta_2 = \frac{1.00}{1.46} \sin 30° = 0.342$$

$$\theta_2 = 20.0°$$

إذن :

$$\theta_3 = 60° - 20.0° = 40.0°$$

$$\sin \theta_4 = \frac{1.46}{1.00} \sin 40.0° = 0.934$$

$$\theta_4 = 69.8°$$

تحقق من فهمك للسبب فى أن الشعاعين عند A و B ينحنيان كما هو مبين فى الشكل 24-23 .

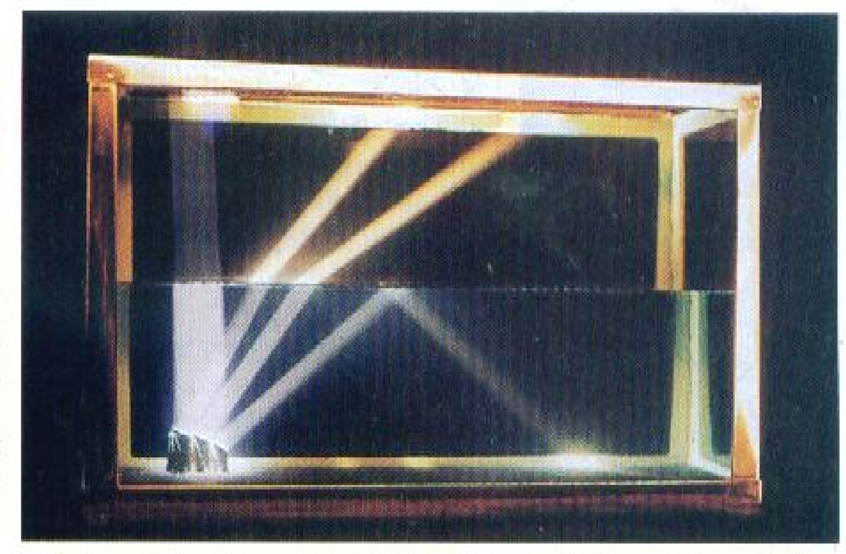
تمرين : افترض أن نفس المنشور المصنوع من كوارتز منصهر قد أحيط بزجاج فلنت بدلاً من الهواء . ارسم تخطيطيًا مسار نفس الشعاع الساقط خلال المنشور .

الإجابة : (cmh,6p)

10-23 الانعكاس الداخلى الكلى

يدين الألماس بقدر كبير من جماله لظاهرة بصرية تسمى **الانعكاس الداخلى الكلى** . وهذه الظاهرة مسئولة أيضًا عن قدرة الألياف الزجاجية على حمل الضوء وتوجيهه من خلال المنحنيات والمنعطفات . وتستخدم هذه الألياف البصرية فى كثير من التطبيقات العملية المهمة ومنها أجهزة الألياف البصرية التشخيصية فى الطب وكابلات الألياف البصرية التى خلقت ثورة فى عالم الاتصالات ولا تزال فى حالة تطور .

ولكى نفهم الانعكاس الكلى الداخلى سنبدأ بدراسة عملية مرور الضوء من وسط إلى وسط ثان معامل انكساره **أصغر** من الأول ويبين الشكل 25-23 مثلاً ، مصدرًا ضوئيًا O يقع تحت سطح بركة ماء . وعندما يمر الشعاع B من الماء إلى الهواء فإنه ينكسر مبتعدًا عن العمود المقام على سطح الماء . ومن الطبيعى أن يحدث بعض الانعكاس أيضًا عند السطح وهكذا يكون B' هو الشعاع المنعكس . وتنقسم الطاقة التى يحملها الشعاع الساقط



تنكسر أشعة الضوء القادمة من وسط معامل انكساره أكبر في قاع الإناء إلى وسط معامل انكساره أقل ، فتنحني مبتعدة عن العمود المقام على الحد الفاصل . وإذا كانت زاوية السقوط كبيرة بما يكفي فلن يكون هناك شعاع منكسر وينعكس الشعاع الساقط كليا .

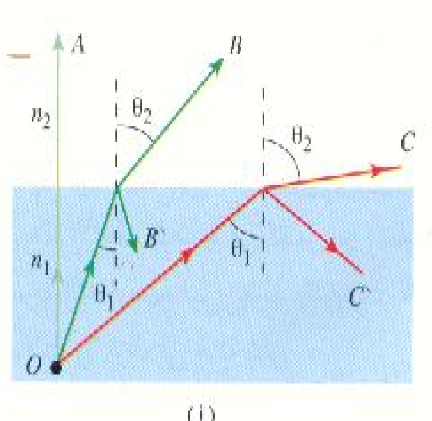
بين الشعاع المنكسر والشعاع المنعكس . وسنفحص الآن شعاعًا آخر C ساقطًا بزاوية أكبر من العمود . والشعاع المنعكس C' سوف يحمل جزءًا من الطاقة الساقطة أكبر مما يحمل الشعاع B' الذي انعكس فكان أقرب إلى العمود .

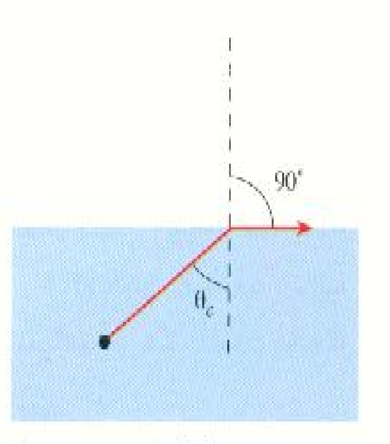
على أن هناك شعاعًا فاصلاً ، يبينه الشكل 25-23 (ب) بحيث يكون الشعاع المنكسر المناظر له موازيًا للسطح ($\theta_2 = 90°$). ويحدث هذا عند **زاوية حرجة** للسقوط هي θ_c . فإذا كانت زاوية السقوط أكبر من θ_c فلن يكون هناك شعاع منكسر . وينعكس **كل** الضوء الساقط مرة أخرى داخل الماء مكونًا انعكاسًا داخليًا كليًا . ويعطينا قانون سنل قيمة الزاوية الحرجة بالنسبة لأي زوجين من الأوساط :

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90° = n_2\, 1.00$$

ولذلك

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{أو} \qquad \theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} \qquad (23\text{-}7)$$





شكل 25-23:
عندما تكون θ_1 أكبر من الزاوية الحرجة θ_2 فإن الشعاع يعاني من انعكاس داخلي كلي .

من المهم جدًا تذكر أن الانعكاس الداخلي الكلي لا يحدث إلا إذا كان $n_2 < n_1$. وحيث أنه لا توجد زاوية لها جيب أكبر من الواحد لذا فليس للمعادلة 7-23 حل إلا إذا كانت $n_2 < n_1$.

عندما يكون الوسط 2 هواء فيمكن التحقق بسهولة أي $\theta_c = 49°$ للماء و $41°$ لزجاج

قلنت و °24.4 للألماس . والضوء القادم من أية جهة يمكنه دخول الألماس (وليست هناك زاوية حرجة للضوء حتى ينكسر داخل أية مادة معامل انكسارها أكبر من ذلك) ولكن الضوء الذى يخرج من الألماس لابد أن يخرج بزوايا قريبة من العمود المقام على أحد أوجه الألماس . ولهذا ينعكس الضوء داخليًا عدة مرات قبل أن يخرج . ويقوم صانعوا الألماس بقطع أوجه كثيرة جدًا فى كل قطعة ألماس . ولأن الضوء يتعرض لكثير من الانعكاسات الداخلية لذا فإن كل وجه يستقبل فى النهاية جزءًا من الضوء الساقط بزاوية أصغر من °24.4 . وعندما تدير قطعة من الألماس فى يدك ستأخذ فى التلألؤ لأن الضوء الذى تراه يخرج متعامدًا تقريبًا مع كل من الأوجه العديدة .



تعرض الصورة بوضوح مقدرة الألياف البصرية على احتواء وتوصيل الضوء من خلال الانعكاس الداخلى . وعندما يتشتت كسر صغير من ضوء الليزر الداخل إلى هذه الليفة بواسطة بعض الاضطرابات الميكروسكوبية فى الليفة وسطحها ، فإن الليفة نفسها تصبح مرئية . وتلاحظ الشدة الكبيرة للضوء المنقول عبر الألياف والتى تخرج من الطرف الآخر لها لكى تصنع بقعة ضوئية على الأرض عند الطرف السفلى الأيمن للصورة .

مثال توضيحى 2-23

يوضح الشكل 26-23 ضوءًا ساقطًا على منشور قائم الزاوية ومتساوى الساقين من الزجاج . أثبت أن الضوء يعانى من انعكاس داخلى كلى ويخرج بزاوية °90 مع اتجاهه الأصلى . اعتبر المنشور محاطًا بالهواء .

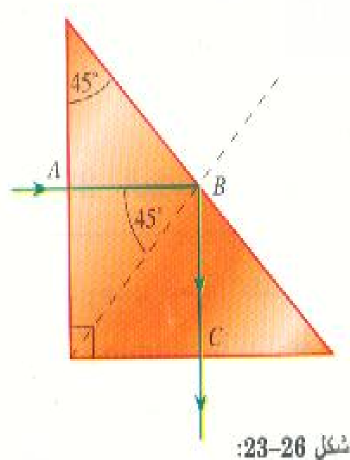
استدلال منطقى :

يدخل الضوء إلى المنشور دون أى انحناء عند النقطة A لأنه يرتطم بالسطح بامتداد العمود ($\theta_1 = 0°$) . وحيث أن زاويتين بالمنشور مقدار كل منهما °45 فإن زاوية السقوط عند النقطة B تكون °45 . والزاوية الحرجة للحد الفاصل بين الزجاج والهواء هى $\sin^{-1}(1/1.52) = 41.1°$. ولهذا لا يمكن لأى جزء من الشعاع الساقط أن ينكسر إلى الهواء عند B . وزاوية الانعكاس عند B تساوى زاوية السقوط أى أن الشعاع سينعكس بنسبة مائة فى المائة وبزاوية مقدارها °90 بالنسبة لاتجاهه الأصلى . ويرتطم هذا الشعاع بالحد الفاصل بين الزجاج والهواء عند النقطة C على طول اتجاه العمود ولهذا فهو يخرج قائمًا خلال الحد كما هو مبين فى الشكل 26-23 .

إن الانعكاس الداخلى هو بالفعل كلى ، بل إنه أكثر كمالاً من الانعكاس من على أى سطح مفضض . ويستخدم هذا النوع من المناشير فى صناعة المناظير ثنائية العينية (المناظير المعظمة) لكى يحدث تحولاً دقيقًا مقداره زاوية قائمة فى مسار الضوء .

تمرين : إذا غمس المنشور فى الماء ، فهل سيظل الضوء معرضًا للانحناء بزاوية قائمة ؟

الإجابة : إن الزاوية الحرجة للحد الفاصل بين الزجاج والماء هى °61 (إثبت ذلك) ، ولذلك لابد أن يوجد شعاع منكسر داخل الماء عند النقطة B . كما أن بعض الضوء سينعكس كالسابق وإن كانت شدته ستكون منخفضة جدًا .

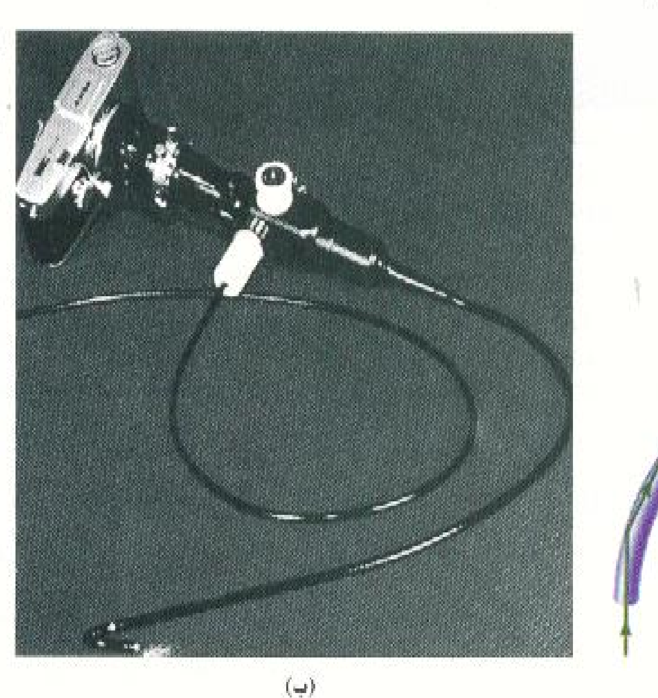


شكل 26-23:
يعانى الضوء الساقط عموديًا على أحد أوجه منشور قائم الزاوية من انعكاس داخلى كلى ويخرج بزاوية مقدارها °90 مع الاتجاه الأصلى .

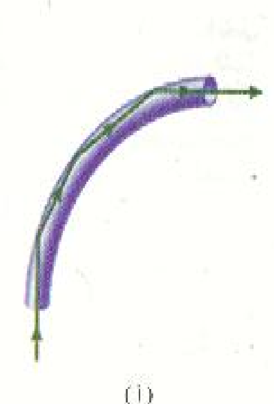
وتتيح ظاهرة الانعكاس الداخلى ضخ الضوء خلال « أنابيب » من خلال المنعطفات . فالضوء الذى يدخل طرف قضيب ذى انحناءة خفيفة يعانى من انعكاس داخلى كلى حول المنحنى كما هو مبين فى الشكل 27-23 (أ) . وعندما تستخدم مجموعة من هذه القضبان المنحنية (وهو ما اصطلح على تسميته **الألياف البصرية**) فإن الصورة المركبة

لجسم ما يمكن نقلها خلال الأنبوبة من مكان إلى آخر . وتسمى مثل هذه النبيطة أنبوبة ضوئية (الشكل 27-23 (ب)) .

تستخدم فى السنوات الأخيرة - الألياف البصرية فى مجال الاتصالات البعيدة ، حيث تقوم حزم من أشعة الليزر بنقل الإشارات الكهربية بدلاً من نقلها بالتيارات الكهربية والموجات اللاسلكية بالطرق التى كانت تستخدم قديمًا فى شركات التليفون . وقد أصبح هذا التطبيق ميسورًا بصناعة ألياف ذات فاقد طفيف جدًا فى الطاقة . ولأن تردد الموجات الضوئية أكبر بكثير جدًا من تردد التيارات الكهربية والموجات اللاسلكية فإن كمية أكبر بكثير من المعلومات يمكن نقلها فى وحدة الزمن بواسطة حزمة بصرية داخل ليفة مقارنة بما ينقل عبر أسلاك تقليدية أو بواسطة حزمة مقاربة لها من الموجات اللاسلكية (الراديو) .



(ب)



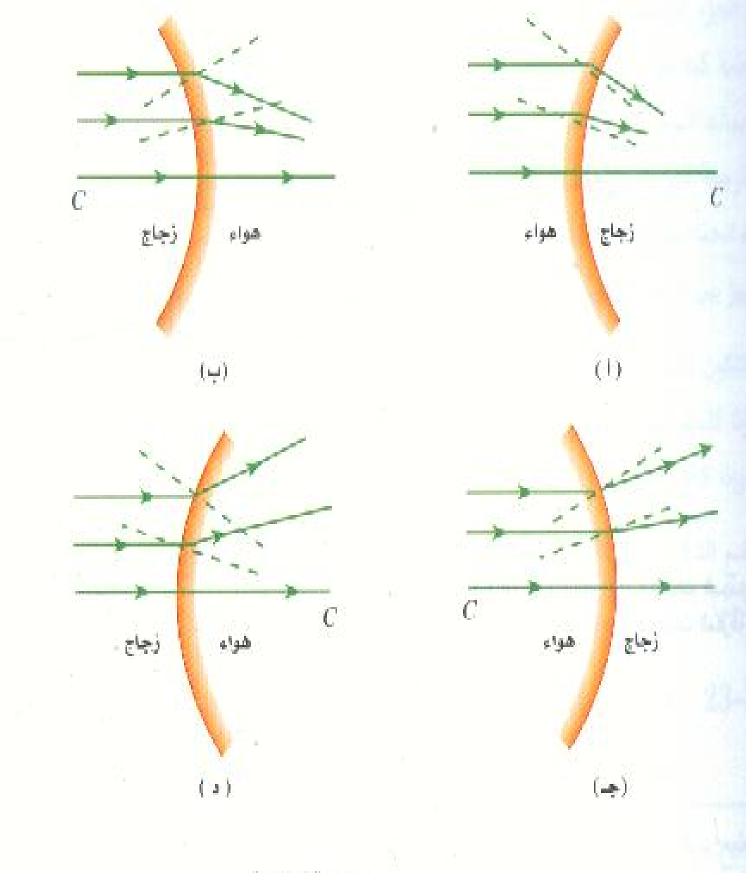
(أ)

شكل 27-23:
(أ) يدفع الضوء إلى المرور عبر ليفة زجاجية بواسطة الانعكاس الداخلى الكلى . (ب) منظار البطن (جاستروسكوب) ويرى متصلاً بآلة تصوير . ويقوم مصدر للضوء (خارج نطاق الصورة إلى اليسار) بتوفير الضوء لحزمة الألياف أسفل الصورة . ويتم إدخال أنبوبة الضوء عبر حلق المريض إلى داخل المعدة . والضوء المنعكس من على جدار المعدة ينعكس عبر الألياف الوسطى للحزمة مكونًا صورة على الفيلم الحساس بآلة التصوير . وكثيرًا ما يستغنى عن آلة التصوير ويلاحظ الضوء بالعين المباشرة (الهيئة البصرية الأمريكية ، قسم الألياف البصرية) .

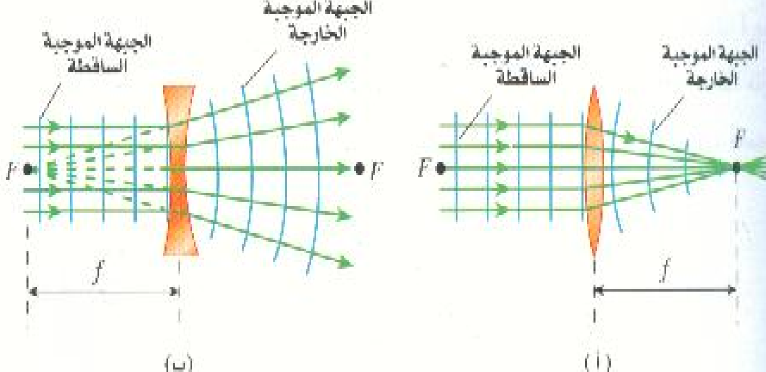
23-11 العدسات الكرِّية

لقد وجدت ظاهرة الانكسار أكثر تطبيقاتها فائدة فى العدسات ومقدرتها على تكوين الصور . وتستطيع عدسة مصنوعة جيدًا أن تركز حزمة من الأشعة الضوئية المتوازية فى منطقة صغيرة عند نقطة بؤرية . ولكى ندرك هذا سنفحص كيف ينطبق قانون سنل على انكسار الضوء الساقط على سطح كرى .

يوضح الشكل 28-23 مقاطع مستعرضة لكرات زجاجية وكذلك بعض الأشعة الساقطة عليها وهى موازية للمحور الرئيسى للكرات . ويرمز لمركز انحناء الكرات فى كل حالة بالنقطة C . ونلاحظ بشكل عام أن تأثير الانكسار عند نقطة مختلفة على السطح هو إما تجميع للأشعة نحو المحور (كما فى الشكلين 28-23 (أ) و (ب)) وإما تفريق الأشعة بعيدًا عن المحور (كما فى الشكلين 28-23 (جـ) و (د)) . وعلى الرغم من أن



شكل 28-23:
الانكسار عند نقط مختلفة على الحد الكرى الفاصل بين الهواء والزجاج .



شكل 29-23:
(أ) تتجمع الأشعة المتوازية فى النقطة البؤرية بواسطة العدسة المجمعة . (ب) وتتفرق وتبدو كما لو كانت قادمة من النقطة البؤرية لعدسة مفرقة .

الأشعة مرسومة بالنسبة للنصف العلوى فقط للأسطح إلا أن الموقف متماثل وهناك أشعة لم ترسم ترتطم بالجزء السفلي أيضًا .

سنقوم الآن بعمل عدستين عن طريق ضم سطحين الشكلين 28-23 (أ) و (ب) وضم سطحى الشكلين 28-23 (جـ) و (د) ، والشكل 29-23 يوضح النتيجة . دعنا نطلق على جانب العدسة الذى يتلقى الأشعة الساقطة « جبهة العدسة » أما الجانب الذى يحتوى على الأشعة المنكسرة « ظهر » العدسة . وعلى الرغم من أننا لا نلجأ للبراهين هنا إلا أنه عند استعمال جزء صغير من السطح الكرى فإن الأشعة المنكسرة فى الشكل 29-23 (أ) ستتجمع فى النقطة F خلف العدسة والأشعة فى الشكل 29-23 (ب) ستتفرق على هيئة بحيث تبدو كما لو كانت قادمة من النقطة F أمام العدسة . . ولهذا يطلق على هاتين العدستين **مجمعة (لامة) ومفرقة** على الترتيب . وتسمى النقط F بالنقطة البؤرية للعدسات والمسافة f ما بين مركز العدسة إلى النقطة F مقاسة على طول المحور

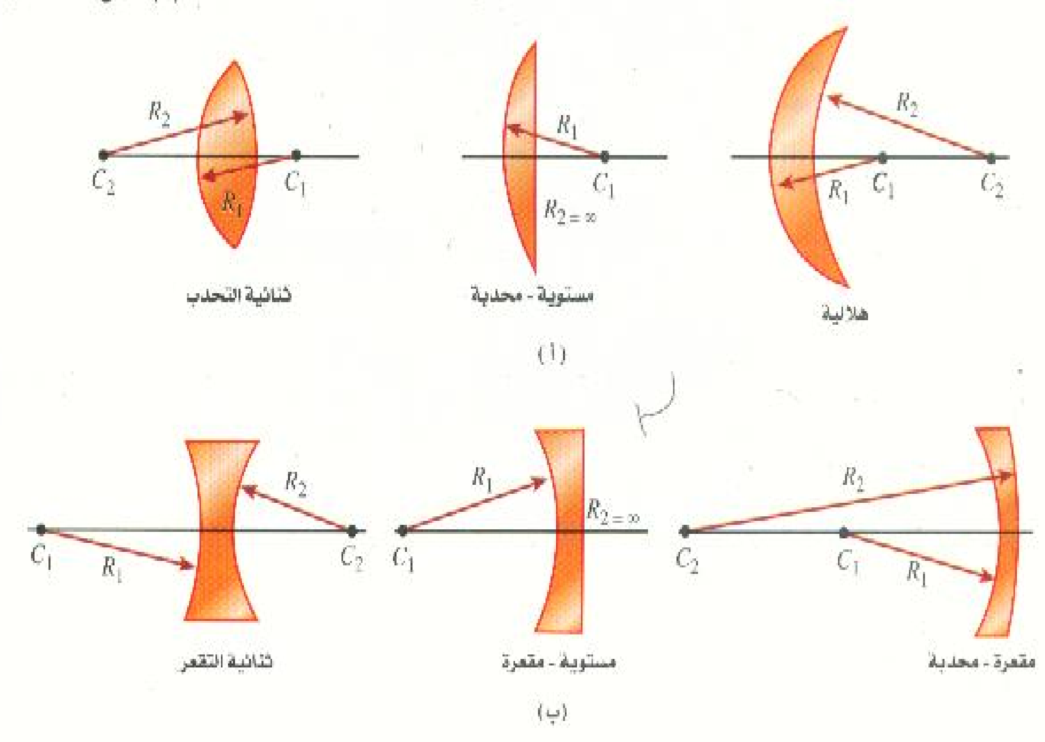
الرئيسى هى البعد البؤرى للعدسة *

النقطة البؤرية (البؤرة) لعدسة مجمعة هى النقطة التى تلتقى عندها الأشعة الساقطة فى اتجاه يوازى المحور الرئيسى بعد مرورها عبر العدسة . أما بؤرة العدسة المفرقة فهى النقطة التى تبدو الأشعة الساقطة فى اتجاه يوازى المحور الرئيسى وكأنها تتفرق من عندها بعد مرورها عبر العدسة .

وحيث أن الضوء يستطيع النفاد من العدسة فى كلا الاتجاهين ، فإن للعدسة بؤرتين واحدة على كل جانب . وإذا كانت العدسة **رقيقة** ، أى إذا كان سمكها أقل كثيرًا من بعدها البؤرى فإن البؤرتين تقعان على مسافتين متساويتين على جانبى العدسة .

وهناك طريقة بديلة لوصف الخاصية الانكسارية للعدسة . لقد تعلمنا فيما سبق أن الانكسار عند سطح فاصل هو نتيجة اختلاف سرعة الضوء فى كل من الوسطين فالجزء الأوسط من الموجة المستوية الساقطة فى حالة العدسة اللامة يقع خلف الأجزاء الخارجية ،

شكل 30-23:
(أ) أنواع مختلفة من العدسات المجمعة .
(ب) أنواع مختلفة من العدسات المفرقة .



* يتحدد البعد البؤرى لعدسة ما بعدد من العوامل أكثر من حالة البعد البؤرى للمرآة ، نظرًا لأن للعدسة سطحين منحنيين ، ويعتمد مقدار الانكسار عند هذين السطحين أيضًا على معامل انكسار العدسة بالنسبة للوسط المحيط بها . ويعرف التعبير الرياضى الذى يربط كل هذه العوامل معًا **بمعادلة صانع العدسات :**

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

حيث $n = n_{lens} / n_{surr\ medium}$ ، أى النسبة بين معاملى انكسار العدسة والوسط المحيط .

أما R_1 و R_2 فهما نصفا قطرى انحناء السطح الأمامى والسطح الخلفى للعدسة على الترتيب . وتكون إشارتهما موجبة عندما يكون السطح الذى يمثلانه محدبًا ناحية الضوء وسالبة عندما يكون مقعرًا ناحية الضوء . وتعطى هذه المعادلة الإشارة الصحيحة للبعد البؤرى f بالنسبة لجميع أشكال العدسات المبينة فى الشكل 30-23 .

لأن الجزء الأوسط ينتقل مسافة أطول خلال الزجاج مما يجعل الجبهة الموجية الخارجة منحنية كما هو مبين فى الشكل 29-23 (أ) . ولما كانت الأشعة متعامدة دائمًا على الجبهات الموجية ، فإنها تتجمع نحو البؤرة F . وبالنسبة لعدسة مفرقة فإن الأجزاء الخارجية للموجة تتخلف أكثر من الجزء الأوسط مما يجعل الجبهات الموجية الخارجية ذات انحناء معكوس ، كما هو مبين فى الشكل 29-23 (ب) . ويتيح لنا هذا الملمح أن نعمم التمييز بين الأشعة التجمعة والمتفرقة إلى ما دون هذين النوعين المبينين فى الشكل 29-23 .

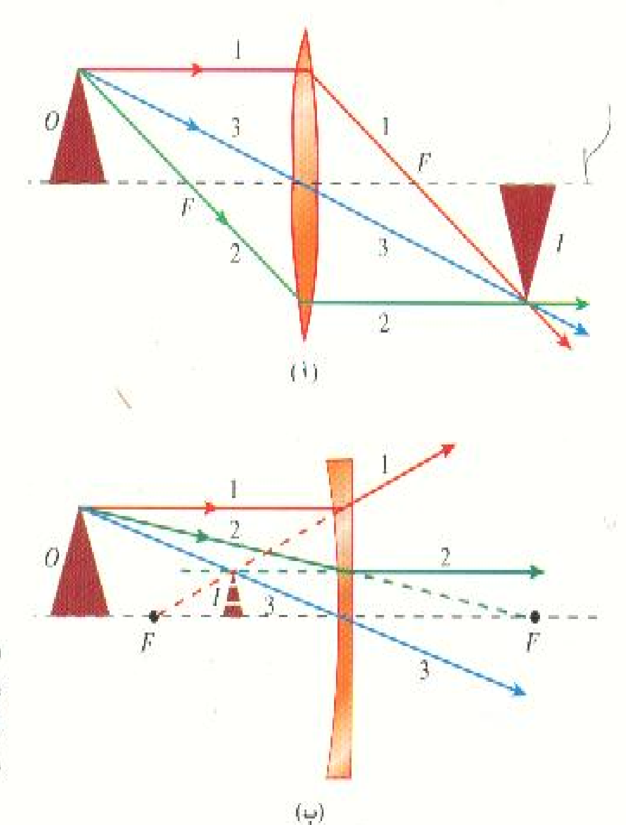
1 تتكون العدسات الكرية من أجزاء من أسطح كرتين .

2 إذا كانت العدسة أسمك عند المحور الرئيسى عنها عند الحواف فإنها تكون مجمعة ، وإذا كانت أنحف (أرفع) عند المحور الرئيسى عنها عند الحواف فهى مفرقة .

ويوضح الشكل 30-23 بعض أمثلة هذين النوعيين مقرونًا بمراكز وأنصاف أقطار تحدب أسطحها .

23-12 رسم مسار الأشعة بالنسبة للعدسات الرقيقة ؛ معادلة العدسة الرقيقة

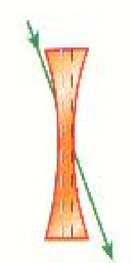
نستطيع ـ كما فعلنا فى حالة المرايا ـ أن نستخدم ثلاثة أشعة خاصة لكى نحدد موقع الصورة المتكونة بواسطة عدسة رقيقة . وقد رأينا بالفعل الشعاع رقم 1 فى الشكل 29-23 ، إذ إنه الشعاع الموازى للمحور الرئيسى . وهو ينكسر نحو البؤرة خلف العدسة بواسطة العدسة المجمعة ، وينكسر فى اتجاه مبتعد عن البؤرة أمام العدسة المفرقة . وقد ميزنا الشعاع رقم 1



شكل 31-23:
تستخدم ـ كما فى حالة المرايا ـ ثلاثة أشعة خاصة لتحديد موقع الصورة المتكونة بواسطة العدسة .

باللون الأحمر فى الشكل 31-23 . أما الشعاع رقم 2 فهو الذى يمر خلال البؤرة الأمامية قبل أن يرتطم بالعدسة المجمعة أو يتجه نحو البؤرة خلف العدسة قبل أن يرتطم بالعدسة المفرقة . وفى كلتا الحالتين فإن الشعاع رقم 2 يخرج من العدسة موازيًا للمحور الرئيسي كما هو مبين بالشعاع الأخضر فى الشكل 31-23 . ويمر الشعاع رقم 3 مباشرة خلال مركز العدسة بدون انحراف . ومن السهل معرفة السبب فى هذا السلوك إذا رجعنا إلى الشكل 32-23 ، حيث يلاحظ أن الشعاع يدخل إلى العدسة ويغادرها عند سطحين متوازيين ، ولذلك يتصرف الشعاع كما لو كان يخترق لوحًا مسطحًا من الزجاج ، ولعلك تذكر من المثال 5-23 أن شعاع الضوء لا ينحرف فى الاتجاه بواسطة لوح زجاجى سطحاه متوازيان . إن الشعاع يتزحزح قليلاً ويمكننا تجاهل هذا التأثير إذا تغاضينا عن سمك العدسة .

إن أى اثنين من هذه الأشعة كافيان لتحديد موقع صورة جسم ما . ويلاحظ فى الشكل 31-23 (أ) أن الصورة حقيقية لأن الأشعة الثلاثة تتجمع معًا وإذا وضع حائل عند تلك النقطة لظهرت عليه الصورة . على أن الشكل 31-23 (ب) يبين صورة تقديرية لأن الأشعة المنكسرة تتفرق على نحو يبدو وكأن الأشعة قادمة من نقطة أمام العدسة ، وهذه النقطة هى موضع الصورة التقديرية وإذا وضع حائل هناك فلن تظهر عليه أية صورة .

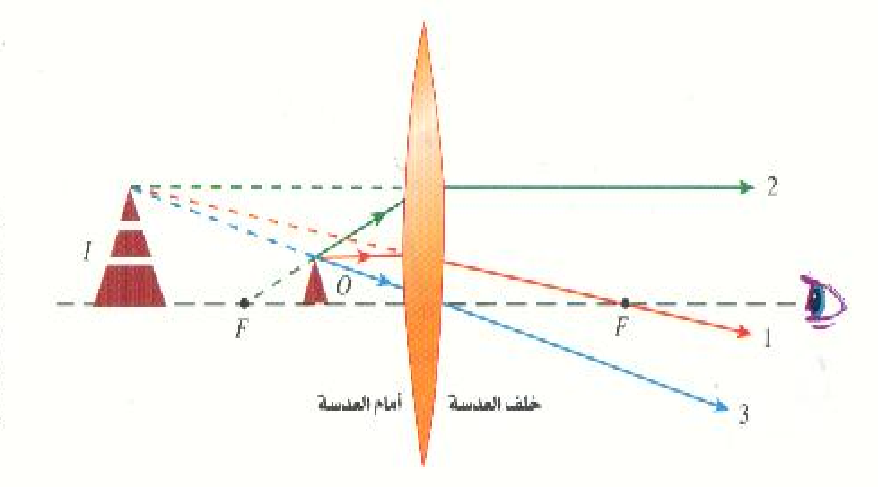


شكل 32-23: يمر الشعاع الذى يخترق منتصف العدسة بالضرورة من خلال لوح مسطح (يحدده الخطان المتقطعان) ولهذا فإنه لا ينحرف . وتحدث زحزحة طفيفة للشعاع وإن كانت غير مبينة بالشكل . لماذا اعتبرت الزحزحة مهملة فى حالة العدسة الرقيقة ؟

مثال توضيحى 3-23

تستخدم عدسة مجمعة بعدها البؤرى 10.0 cm لتكوين صورة لجسم موضوع على بعد 5.0 cm أمام العدسة . ارسم مسار الأشعة لكى تحدد موقع الصورة .

استدلال منطقى : يوضح الشكل 33-23 مسار الأشعة المناظر لهذه الحالة ، ويلاحظ أن العين التى ترصد الأشعة المنكسرة خلف العدسة سوف تعتبر أن الأشعة صادرة من الموقع المبين . والصورة فى هذه الحالة تقديرية ومعتدلة ومكبرة .

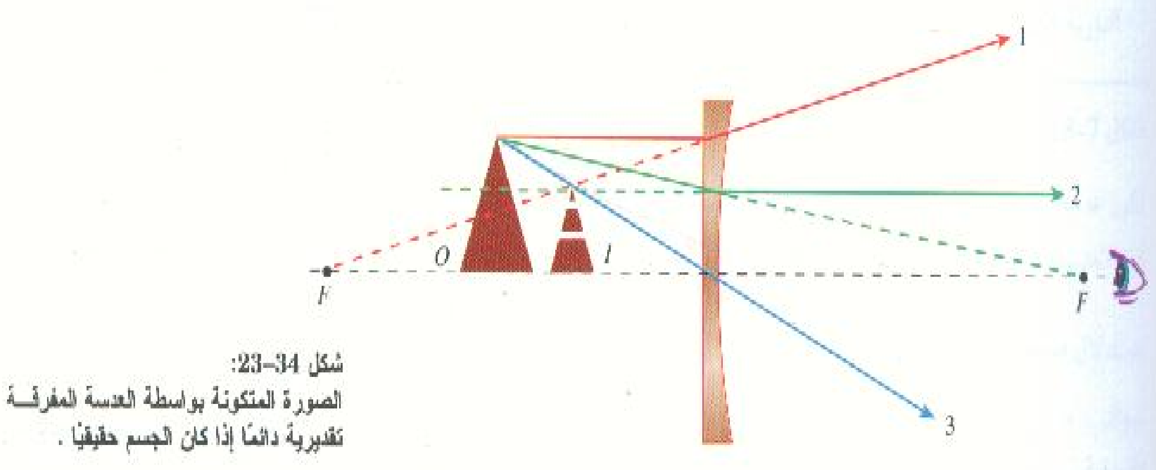


شكل 33-23: تتكون صورة تقديرية بواسطة العدسات المجمعة (المحدبة) عندما يكون الجسم أقرب من البعد البؤرى ؛ وترى العين الأشعة التى تبدو كما لو كانت قادمة من الصورة I .

مثال توضيحى 4-23

تستخدم عدسة مفرقة بعدها البؤرى $-10.0\ cm$ لتكوين صورة جسم موضوع على بعد $5.0\ cm$ أمام العدسة . أوجد الصورة بواسطة رسم مسار الأشعة .

استدلال منطقى : يوضح الشكل 34-23 الرسم المناظر لمسار الأشعة والصورة هنا تقديرية أيضًا . وهى معتدلة ومصغرة .

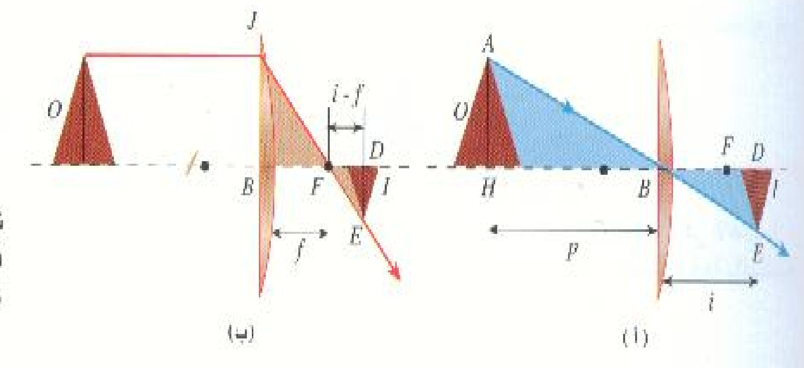


شكل 34-23:
الصورة المتكونة بواسطة العدسة المفرقة تقديرية دائمًا إذا كان الجسم حقيقيًا .

معادلة العدسة الرقيقة

يعتبر رسم مسار الأشعة ، أسلوبًا مفيدًا لتخطيط العلاقة بين الصورة والجسم . إلا أننا نود أن نطرح وسيلة تحليلية لتناول هذه العلاقة . وسنبدأ هذه العملية بدراسة الصورة المتكونة بواسطة العدسة المبينة فى الشكل 35-23 . المثلثان ABH و EBD فى الشكل (أ) متشابهان ولذا يمكننا أن نكتب الآتى :

$$\frac{I}{O}=\frac{i}{p}$$



شكل 35-23:
المثلثان ABH و EBD متشابهان وكذلك المثلثان JFB و EDF .

وقد استخدمنا نفس الرموز هنا بالنسبة لبعد الجسم وبعد الصورة مثلما فعلنا فى حالة المرايا . ومن المثلثين المتشابهين JFB و EDF فى الجزء (ب) نحصل على :

$$\frac{I}{O}=\frac{i-f}{f}$$

وبمساواة المعادلتين وإجراء بعض الاختصارات :

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{i}=\frac{1}{f} \qquad (23\text{-}2)$$

هذه العلاقة هي نفس معادلة المرايا بالضبط ولذلك أعطيناها نفس الرقم . وقد اعتبرنا p موجبًا بالنسبة لجسم أمام العدسة واعتبرنا i موجبًا بالنسبة للصورة الحقيقية المتكونة خلف العدسة .

أما بالنسبة للعدسات المفرقة فيمكننا اشتقاق العلاقة بالإشارة إلى مجموعات المثلثات المتشابهة في الشكل 36-23 . ونجد عندئذ

$$\frac{I}{O}=\frac{i}{p} \qquad \text{و} \qquad \frac{I}{O}=\frac{f-i}{f}$$

وبمساواة هاتين المعادلتين وإجراء الاختصارات نجد أن

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{i}=\frac{-1}{f}$$

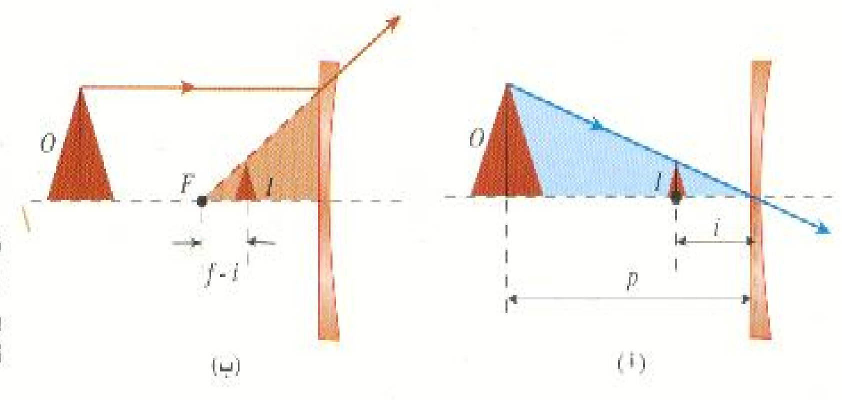
ونستطيع جعل هذه المعادلة متطابقة مع المعادلة 2-23 إذا اتفقنا على قاعدة الإشارات المستخدمة لكل من f و p و i :

لكي نستخدم المعادلة 2-23 لجميع مواقف العدسات

1 بعد الجسم p موجب إذا كان الجسم أمام العدسة وسالب إذا كان خلفها (سوف نتناول القيم السالبة لبعد الجسم في القسم التالي) .

2 بعد الصورة i موجب إذا تكونت الصورة خلف العدسة (صورة حقيقية) وسالب إذا تكونت الصورة أمام العدسة (صورة تقديرية) .

3 البعد البؤري موجب بالنسبة لعدسة مجمعة وسالب لعدسة مفرقة .



شكل 36-23:
إن أخذ المثلثات المتشابهة في الاعتبار ، يؤدي إلى معادلة العدسة الرقيقة بالنسبة للعدسات المفرقة .

ونستطيع بمساعدة قاعدة الإشارات أن نضع تعريفًا للتكبير كما فعلنا مع المرايا :

$$M=-\frac{i}{p} \qquad (23\text{-}3\ \text{أ})$$

ومرة أخرى : تتيح الإشارة السالبة لنا أن نحدد الصور المقلوبة على أنها ذات القيم

السالبة للتكبير M والصور المعتدلة ستكون M موجبة بالنسبة لها .

والمشاهدات العامة التالية ذات فائدة عند تناول مسائل العدسات :

1. تكون العدسات المفرقة **دائمًا** صورًا تقديرية معتدلة ومصغرة إذا كان الجسم حقيقيًا مهما كان موقع الجسم أمام العدسة .
2. تكون العدسة المجمعة صورة حقيقية مقلوبة للجسم الحقيقي إذا كان ذلك الجسم موضوعًا أبعد من النقطة البؤرية للعدسة . أما إذا كان الجسم أقرب من النقطة البؤرية فإن الصورة المتكونة تكون تقديرية ومعتدلة .

مثال 23-7

تكون عدسة مفرقة بعدها البؤرى 20 cm صورة لجسم طوله 30 cm موضوع على بعد 40 cm أمام العدسة . أوجد موضع الصورة والتكبير . وهل الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هي الإشارات الصحيحة للكميات المعطاة f و p ؟

الإجابة : الجسم موضوع أمام العدسة ولذا $p = +40$ cm . وبما أن العدسة مفرقة فإن $f = -20$ cm .

سؤال : ما الواجب عليّ معرفته حتى أجد التكبير وأحدد ما إذ كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

الإجابة : التكبير هو I/O ويساوى $-i/p$. وإشارة التكبير تدل على ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة .

سؤال : وهل هناك وسيلة تمكننا من توقع ما إذا كانت الصورة معتدلة أم مقلوبة ؟

الإجابة : بما أن لدينا جسمًا حقيقيًا وعدسة مفرقة فإن علينا أن نتوقع وجود صورة تقديرية معتدلة ومصغرة .

الحل والمناقشة : بالرجوع إلى معادلة العدسة نجد أن :

$$\frac{1}{i} = \frac{-2-1}{40\text{ cm}} = \frac{-3}{40\text{ cm}}$$

$$i = \frac{-40\text{ cm}}{3} = 13.3\text{ cm}$$

وتدلنا الإشارة السالبة على أن الصورة تقديرية أمام العدسة أما التكبير فهو :

$$M = -\frac{13.3\text{ cm}}{+40\text{ cm}} = \frac{+1}{3}$$

وتدل الإشارة الموجبة على أن الصورة معتدلة . ومن ثم يكون حجم الصورة هو :

$$I = \frac{1}{3}O = \frac{1}{3}(3.0\text{ cm}) = 1.0\text{ cm}$$

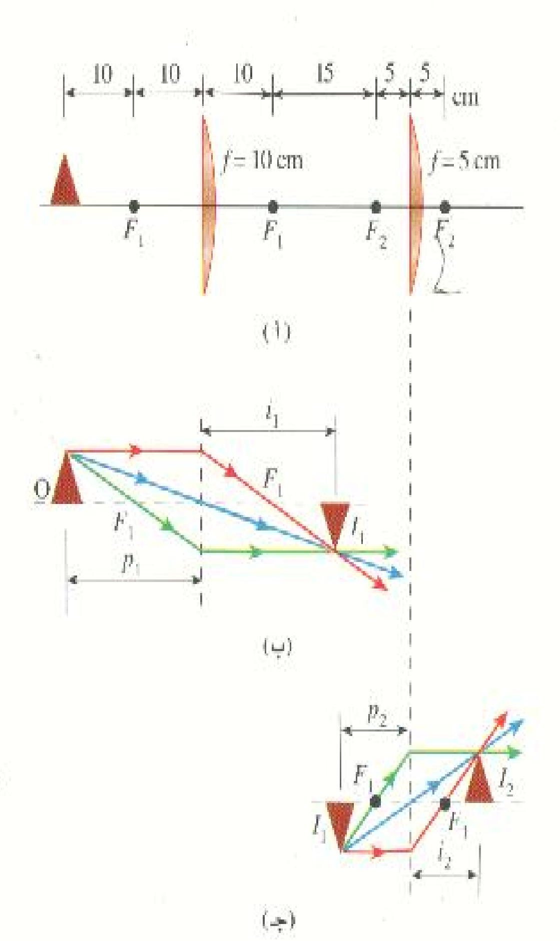
23-13 مجموعات العدسات

تحتوى معظم الأجهزة البصرية على أكثر من عدسة واحدة . ومن السهل تناول **نظم العدسات** هذه إذا تعاملنا معها بأسلوب منهجي . وسنبدأ بتحديد الصورة النهائية التى تكونها عدستان كما فى الشكل 37-23 (أ) . فالجسم يبعد 20 cm عن العدسة الأولى ، التى تبعد بدورها 30 cm عن العدسة الثانية . وكلتا العدستين مجمعة . ولنهمل العدسة الثانية تمامًا كخطوة أولى ونحاول إيجاد الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى . يحدد رسم مسار الأشعة موقع هذه الصورة وهو I_1 كما فى الشكل 37-23 (ب) . وإذا طبقنا معادلة العدسة فإنه يصبح لدينا :

$$\frac{1}{20}+\frac{1}{i_1}=\frac{1}{10}$$

$$i_1 = 20 \text{ cm}$$

ثم نعتبر هذه الصورة التى كونتها العدسة الأولى على أنها جسم بالنسبة للعدسة الثانية . ولكى نتأكد من أن هذا التناول صحيح ؛ علينا ملاحظة أن الأشعة الساقطة على العدسة الثانية هى نفس الأشعة التى قد يبعثها جسم موضوع عند I_1 . علينا الآن إهمال العدسة الأولى واستخدام I_1 كجسم بالنسبة للعدسة الثانية حتى ترسم مسار الأشعة كما فى الشكل 37-23 (جـ) . والصورة النهائية ستكون عند الموقع I_2 . وفى هذا المثال ، تكون الصورة النهائية المتكونة بواسطة العدستين حقيقية ومعتدلة .



شكل 37-23:
علينا عند إيجاد الصورة المتكونة بواسطة مجموعة من العدسات ، أن نتناول كل عدسة على حدة بمفردها .

ولكى نطبق معادلة العدسة على العدسة الثانية علينا ملاحظة أن بعد الجسم p_2 هو $(30\ cm - 20\ cm) = +10\ cm$ ، وتتفق الإشارة الموجبة مع كون هذه النقطة تقع أمام العدسة الثانية ومن ثم :

$$\frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{5\ cm} - \frac{1}{10\ cm} = \frac{1}{10\ cm}$$

$$i_2 = +10\ cm$$

سنطبق الآن تعريفنا للتكبير على كل عدسة لكى نوجد الصورة النهائية وذلك بضرب قيم التكبير المنفردة فى بعضها .

$$M_{tot} = M_1 M_2 = \frac{-i_1}{p_1} \times \frac{-i_2}{p_2} = \frac{-20}{20} \times \frac{-10}{10} = 1$$

ولدينا الآن النتيجة غير العادية وهى أن الصورة النهائية لها نفس حجم الجسم الأصلى وتدل الإشارة الموجبة أن الصورة النهائية معتدلة بالنسبة للجسم الأصلى : فكل عدسة قد كونت صورة مقلوبة للجسم المناظر لها .

وعندما تكون لدينا عدستان فسيكون الموقف بحيث تتكون الصورة **خلف** العدسة الثانية . افترض ، مثلاً ، أن العدستين اللتين استخدمناهما قد وضعتا وبينهما مسافة 15 cm بدلاً من 30 cm . إن الأشعة الخارجة من العدسة الأولى ستظل **متجمعة** عندما تصل إلى العدسة الثانية . ومن الواضح أن هذا ليس هو سلوك الأشعة الصادرة من جسم حقيقى والتى دائمًا **ما تتفرق** . على أننا لسنا مضطرين للبحث عن معادلة جديدة . فكما فعلنا فى القسم السابق ، يمكننا تناول هذه الحالة بأن نعامل الجسم المناظر للعدسة الثانية على أنه **جسم تقديرى** وجعل إشارة المسافة p_2 بينه وبين العدسة الثانية سالبة .

كل الحالات المكنة للعدسات يمكن تناولها بواسطة المعادلة 2-23 لو أننا راعينا الإشارات المتفق عليها فى القسم 12-23 بعناية .

مثال 8-23

أوجد موقع وحجم واتجاه (ما إذا كانت معتدلة أم مقلوبة) الصورة المتكونة بواسطة العدستين المذكورتين فى المناقشة السابقة إذا كانت المسافة بينهما 15 cm .

استدلال منطقى :

سؤال : هل تغير أى شيء يتعلق بالصورة الأولى عند المناقشة السابقة ؟

الإجابة : لا . لقد تجاهلنا تمامًا العدسة الثانية عند معالجة العدسة الأولى ولهذا لن تتأثر الصورة الأولى بموضع العدسة الثانية .

سؤال : ما هو بعد الجسم بالنسبة للعدسة الثانية ؟

الإجابة : بما أن I_1 تتكون الآن على مسافة 5 cm **خلف** العدسة الثانية ، فإن عليك

وضع $p_2 = -5 \text{ cm}$ لبعد هذا الجسم التقديرى . ومن ثم تكون معادلة العدسة بالنسبة للعدسة الثانية هى : $1/i_2 = 1/(5 \text{ cm}) - 1/(-5 \text{ cm})$. تأكد من إنك قد لاحظت مدى العناية التى يجب مراعاتها مع الإشارات .

الحل والمناقشة : إن بعد الصورة الثانية هو

$$\frac{1}{i_2} = \frac{2}{5 \text{ cm}} \qquad \text{أو} \qquad i_2 = 2.5 \text{ cm}$$

ويصبح التكبير هو :

$$M_{tot} = \frac{-20 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} \times \frac{-2.5 \text{ cm}}{-5.0 \text{ cm}} = -0.5$$

أى أن الصورة حقيقية ومقلوبة ومصغرة .

تمرين : أعد المثال السابق مع وضع عدسة مفرقة على أنها العدسة الثانية بحيث كان بعدها البؤرى 10 cm . **الإجابة :** $i_2 = +10 \text{ cm}$ ؛ $M_{tot} = -2$ ؛ **والصورة حقيقية ومقلوبة ومكبرة .**

العدسات فى مجموعات متلاصقة

قد تكون ممن فحصوا نظرهم ولاحظت أن الطبيب يضع أحيانًا أكثر من عدسة معًا أمام عينك . ولكى يصل الطبيب إلى أفضل مجموعة من العدسات فلابد له من وسيلة يجمع بها تأثير العدسات الرقيقة المتلاصقة . ومن السهل اشتقاق الصيغة الضرورية البسيطة ، كما سنرى الآن . وسنتناول الحالة التى تكون فيها الأبعاد البؤرية للعدسات أكبر بكثير من المسافات التى تفصل بين العدسات .

ويعطى موقع الصورة المتكونة بواسطة العدسة الأولى من المعادلة :

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_1} = \frac{1}{f_1}$$

سنفحص الآن الحالة التى تكون فيها العدسة رقم 1 مجمعة وتكوّن صورة حقيقية وبما أن هذه الصورة ستقع خلف العدسة رقم 1 فلابد أن تكون أيضًا خلف العدسة رقم 2 لأننا سنعتبر العدستين عند نفس الموقع عمليًا ، وهذا هو ما عنيناه بقولنا أن المسافة بين العدسات مهملة إلى جانب أبعادها البؤرية . وهكذا تكوّن الصورة الأولى جسمًا تقديريًا للعدسة 2 ولذا فإن $p_2 = -i_1$ طبقًا لقاعدة الإشارات وتعطينا معادلة العدسة 2 ما يلى :

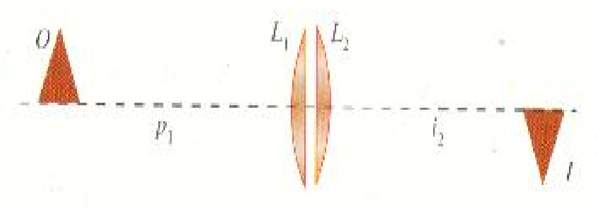
$$\frac{1}{-i_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_2}$$

وبجمع معادلتى العدستين معًا فإن i_1 تختفى :

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{i_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

وكما يتضح من الشكل 23-38 ، فإن p_1 هو موقع الجسم الأصلى و i_2 هو موقع الصورة

النهائية . أى أن هذه المعادلة هى نفس معادلة العدسة بالنسبة **لعدسة منفردة بعدها** البؤرى f يعطى بالعلاقة :



شكل 38-23:
عندما تكون العدستان متلاصقتين معًا فإن تأثيرهما المزدوج هو أنهما تعملان كعدسة منفردة بعدها البؤرى هو :
$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2} \tag{23-8}$$

ويمكن مد استعمال المعادلة (8-23) لتشمل أكثر من عدستين وكلها متلاصقة طالما كان سمك المجموعة مهملاً إذا قورن بالأبعاد البؤرية المنفردة. كما أن هذه المعادلة تنطبق أيضًا على أية مجموعة من العدسات المجمعة والمفرقة طالما استعملت الإشارات الصحيحة للأبعاد البؤرية .

مثال توضيحى 5-23

وضعت ثلاث عدسات متلاصقة مع بعضها البعض . وكانت أبعادها البؤرية على الترتيب هى 20 ، 30- ، 60 cm . ما هو البعد البؤرى للمجموعة ؟ وهل المجموعة تكافئ عدسة مجمعة أم مفرقة ؟

استدلال منطقى : يعطى البعد البؤرى الفعال للمجموعة بالمعادلة 8-23 :

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}+\frac{1}{f_3}=\frac{1}{20\text{ cm}}+\frac{1}{-30\text{ cm}}+\frac{1}{60\text{ cm}}=\frac{3-2+1}{60\text{ cm}}=\frac{2}{60\text{ cm}}$$

$$f=30\text{ cm}$$

وبما أن f موجب فالمجموعة مجمعة .

تدريب : إذا كان البعد البؤرى للعدسة الثالثة فى المثال التوضيحى السابق هو $f=-60\text{ cm}$ بدلاً من +60 cm ، فإثبت أن العدسات الثلاث ستعمل معًا كلوح مسطح من الزجاج .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) قوانين الانعكاس والانكسار ، (ب) الجبهة الموجية ، (جـ) الشعاع ، (د) الموجة المستوية ، (هـ) الصورة الحقيقية والتقديرية ، (و) الجسم الحقيقى والتقديرى ، (ز) النقطة البؤرية (البؤرة) والبعد البؤرى ، (ح) معامل الانكسار ، (ط) الانعكاس الداخلى الكلى ، (ى) الزاوية الحرجة ، (ك) بعد الجسم ، (ل) بعد الصورة ، (م) نصف قطر الانحناء ، (ن) المرايا والعدسات المجمعة (اللامة) والمفرقة ، (س) التكبير .

2 أن تذكر الحدود التقريبية للأطوال الموجية للضوء المرئى وأن تذكر الألوان التقريبية المصاحبة لطول موجى معين .

3 أن تستطيع حساب معامل انكسار وسط ما إذا عرفت سرعة الضوء فيه والعكس بالعكس .

4 أن ترسم الأشعة المناظرة لمجموعة معينة من الجبهات الموجية والعكس بالعكس . وأن تشرح السبب فى أن المصدر البعيد تنتج عنه أشعة متوازية .

5 أن ترسم الشعاع المنعكس عندما يكون الشعاع الساقط على سطح أملس معلومًا .

6 أن تستخدم قانون سنل فى حالات بسيطة .

7 أن تشرح السبب فى أن الانعكاس الداخلى الكلى لا يحدث إلا عندما يكون $n_2 > n_1$. وأن تحسب الزاوية الحرجة للانعكاس الداخلى الكلى فى حالة حد فاصل بين وسطين لهما معاملا انكسار معلومان .

8 أن تستخدم رسم مسارات الأشعة بالنسبة لمرايا كرية منفردة وعدسات رقيقة . وأن تذكر خصائص الصورة فى أية حالة معينة .

9 أن تستخدم معادلة صانع العدسات فى حساب البعد البؤرى لعدسة رقيقة إذا عرفت أنصاف أقطار انحناء أسطح للعدسات والمادة التى صنعت منها .

10 أن تستخدم معادلة العدسات أو المرايا لإيجاد p و i أو f إذا علم اثنان من الثلاثة . وأن تربط بين f ونصف قطر انحناء مرآة كرية . أن تفسر معنى إشارات كل من p و i و f فى أية حالة معينة .

11 أن تعين تكبير واتجاه صورة ما إذا عرفت قيم p و i .

12 أن تذكر ما إذا كانت العدسة مفرقة أو مجمعة من مجرد رؤية شكلها وهى فى الهواء .

13 أن تشرح كيفية تعيين البعد البؤرى لمرآة مقعرة وعدسة مجمعة بتجربة عملية .

14 أن تحسب البعد البؤرى الفعال لعدد من العدسات الرقيقة المتلاصقة معًا عندما تكون الأبعاد البؤرية المنفردة لها معلومة .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

قانون الانعكاس

زاوية السقوط = زاوية الانعكاس $\theta_i = \theta_r$

أنواع الأجسام والصور

الجسم الحقيقى : هو الجسم الموضوع أمام العدسة أو المرآة . والأشعة الساقطة من جسم حقيقى تشكل نمطًا متفرقًا .

الصورة الحقيقية : هى الصورة المتكونة خلف عدسة أو أمام مرآة . وتتجمع الأشعة المكونة لصورة حقيقية فعليًا خلال نقطة .

الصورة التقديرية : هى الصورة الواقعة أمام عدسة أو خلف مرآة . وتتفرق الأشعة المكونة لصورة تقديرية من نقطة الصورة .

الجسم التقديرى : هو الجسم الواقع خلف عدسة أو مرآة . وتشكل أشعة الجسم التقديرى نمطًا متجمعًا من الأشعة الساقطة على العدسة أو المرآة . ويتطلب هذا أن تكون هذه الأشعة صادرة من عدسة أو مرآة سابقة .

الأشعة الرئيسية للمرايا المقعرة

للمرآة المقعرة بؤرة أمام المرآة على مسافة مقدارها $f = R/2$ من المرآة . والأشعة الرئيسية اللازمة لتحديد موضع الصورة هى :

1 شعاع ساقط مواز للمحور الرئيسى وينعكس عبر النقطة البؤرية (البؤرة) .

2 شعاع ساقط على طول خط يخترق النقطة البؤرية ، ويوازى المحور الرئيسى عند انعكاسه .

3 شعاع ساقط على طول خط يمر خلال مركز الانحناء وينعكس مرتدًا على نفسه .

الأشعة الرئيسية للمرايا المحدبة

للمرآة المحدبة بؤرة خلف المرآة وعلى مسافة مقدارها $f = R/2$ من قمة المرآة . والأشعة الرئيسية اللازمة لتحديد موقع الصورة هي :

1 شعاع ساقط موازٍ للمحور الرئيسي وينعكس على طول خط يتجه بعيدًا عن البؤرة .

2 شعاع ساقط على طول خط يتجه نحو البؤرة وينعكس موازيًا للمحور الرئيسي .

3 شعاع ساقط على طول خط يتجه نحو مركز الانحناء وينعكس مرتدًا على طول نفس الخط .

معادلة المرآة

يرتبط البعد البؤرى f وبعد الجسم p وبعد الصورة i بمعادلة المرآة :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

وتستخدم قاعدة الإشارات التالية :

f : موجب للمقعرة وسالب للمحدبة .

p : موجب للجسم الحقيقى وسالب للجسم التقديرى .

i : موجب للصورة الحقيقية وسالب للصورة التقديرية .

التكبير (M)

$$M = \frac{I}{O}$$

حيث I و O هى الأبعاد الخطية للصورة والجسم على الترتيب . ويمكن التعبير عنه أيضًا بدلالة موضعى الجسم والصورة ،

$$M = \frac{-i}{p}$$

وهذا يعطى قيمة موجبة للتكبير M للصورة المعتدلة وقيمة سالبة للصورة المقلوبة .

معامل الانكسار (n)

$$\frac{c}{v} = \frac{\text{سرعة الضوء فى الفراغ}}{\text{سرعة الضوء فى المادة}} = n$$

ويتباطأ الضوء عند الانتقال عبر المواد الشفافة بحيث $n > 1$ لجميع المواد .

قانون الانكسار (قانون سنل)

يرتبط الشعاع الساقط والشعاع المنكسر عند الحد الفاصل بين مادتين لهما معاملا انكسار n_1 و n_2 بالعلاقة :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

وتقاس هذه الزوايا بالنسبة للعمود المقام على الحد الفاصل عند نقطة السقوط .

الانعكاس الداخلى الكلى

عندما يمر الضوء من مادة معامل انكسارها n_1 أكبر إلى وسط معامل انكساره n_2 أقل فإن الانكسار يكون مستحيلاً إذا زادت زاوية السقوط عن قيمة حرجة معينة θ_c . وعندئذ ينعكس الشعاع الساقط بنسبة مائة بالمائة مرتدًا إلى المادة التى سقط منها . وهذا ما يسمى الانعكاس الداخلى الكلى ، وتعطى θ_c بالعلاقة :

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

العدسات الكرية الرقيقة ومعادلة العدسة الرقيقة

العدسة الرقيقة هى التى يكون بعدها البؤرى أكبر بكثير من سمك العدسة . وسطحا العدسة كرويان . ولها نقطتان بؤريتان (بؤرتان) تقعان متماثلتين على جانبى العدسة .

والعدسة **المجمعة** هى التى تكون عند منتصفها أسمك منها عند الحواف أما **العدسة المفرقة** فتكون أسمك عند الأطراف عنها عند المنتصف .

ومعادلة العدسة الرقيقة هى

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{p}+\frac{1}{i}$$

وتستخدم قاعدة الإشارات بالنسبة لكل من p و i مثلما حدث بالنسبة للمرايا . وتتلخص إشارات البعد البؤرى فيما يلى : f موجب للعدسات المجمعة ، f سالب لعدسات المفرقة .

معادلة صانع العدسات

$$\frac{1}{f}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

حيث n هو معامل انكسار مادة العدسة بالنسبة للمادة المحيطة بالعدسة . R_1 هو نصف قطر انحناء السطح الأمامى ، أما R_2 فهو نصف قطر انحناء السطح الخلفى . R_1 و R_2 موجبان إذا كان السطحان محدبين نحو الضوء الساقط ، وسالبان إذا كانا مقعرين .

الأشعة الرئيسية للعدسات الرقيقة

العدسات المجمعة :

1. شعاع يسقط موازيًا للمحور الرئيسى ثم ينكسر خلال النقطة البؤرية البعيدة .
2. شعاع يسقط خلال النقطة البؤرية القريبة ثم ينكسر موازيًا للمحور الرئيسى .
3. شعاع يسقط عند منتصف العدسة فيمر مباشرة عبرها .

العدسات المفرقة :

1. شعاع يسقط موازيًا للمحور الرئيسى ثم ينكسر على طول خط يمتد من النقطة البؤرية القريبة .
2. شعاع يسقط على طول خط يخترق النقطة البؤرية البعيدة ثم ينكسر موازيًا للمحور الرئيسى .
3. شعاع يسقط عند منتصف العدسة فيمر مباشرة عبرها .

مجموعات العدسات المتعددة

تنطبق معادلة العدسة على كل عدسة فى المجموعة وتعمل الصورة التى تكونها العدسة الأولى كجسم للعدسة الثانية وهكذا . والتكبير الكلى للعدسات المتعددة هو حاصل ضرب قيم تكبير كل عدسة .

العدسات المتلاصقة

إذا أهملت المسافة بين عدستين بالمقارنة مع بعديهما البؤريين f_1 و f_2 فإن العدستين تعملان كعدسة واحدة ويكون البعد البؤرى الفعال لهما هو .

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}$$

أسئلة وتخمينات

1 لدينا مرآة مقعرة وجسم موجود في اللانهاية . أين تتكون الصورة ؟ وهل هي معتدلة أم مقلوبة ؟ وهل هي أكبر أم أصغر من الجسم ؟ أجب عن هذه الأسئلة عندما يقترب الجسم ببطء نحو المرآة . وسجل المواضع التي يكون عندها الجسم عند تغير أي من الإجابات .

2 أعد السؤال 1 بالنسبة لمرآة محدبة .

3 أعد السؤال 1 بالنسبة لعدسة مجمعة .

4 أعد السؤال 1 بالنسبة لعدسة مفرقة .

5 عندما تنظر في بحيرة صافية أو وعاء كبير ممتلئ بالماء ، فلماذا يبدو الماء دائمًا أضحل (أقل عمقًا) عما هو في الحقيقة ؟

6 استعن برسم الجبهة الموجية لتشرح السبب في أن العدسة قد تكون مجمعة أو مفرقة اعتمادًا على المادة المحيطة بالعدسة .

7 هل يمكن لكوب ماء فارغ أن يجمع حزمة ضوئية في بؤرة ؟ وهل يمكن ذلك إذا كان الكوب مملوءًا ؟ وهل من الممكن أن تشتعل النيران مصادفة إذا وضع وعاء زجاجي ملىء بالماء على جدار نافذة تسطع عليه الشمس ؟

8 كيف يمكنك استخدام معادلة المرآة لإيجاد موضع صورة جسم في مرآة مستوية ؟

9 عندما يمر الضوء من الهواء إلى الزجاج فما الذي يتغير من المقادير الآتية : f أم λ أم v ؟

10 لماذا تستطيع سمكة ذكية في بحيرة هادئة أن تراك وأنت على ضفة البحيرة ، إذا نظرت إلى أعلى بزاوية مقدارها نحو $50°$ مع الخط الرأسي ؟

11 كيف تعمل المرايا ذات الاتجاه الواحد ؟

12 يمكن بناء « فرن شمسى » باستعمال مرآة مقعرة تقوم بتجميع أشعة الشمس في بؤرة على منطقة صغيرة وهي منطقة الفرن . كيف لك أن تتوقع تغير درجة حرارة الفرن عند تغيير مساحة المرآة والبعد البؤرى .

13 تؤدى فقاعة هوائية كروية داخل قطعة من الزجاج عمل عدسة صغيرة . اشرح هذا . وهل هي عدسة مجمعة أم مفرقة ؟

14 كيف يمكن لنا تعيين البعد البؤرى لعدسة مجمعة ؟ ولعدسة مفرقة ؟ ولمرآة محدبة ؟

15 وضعت مرآتان مستويتان بحيث كونتا زاوية قائمة ، ثم وضع جسم بينهما . فكم عدد الصور المتكونة ؟ كرر السؤال لو كانت الزاوية بين المرآتين $30°$.

16 ما هي الزيادة في طول الفترة الزمنية بالتقريب التي تستغرقها نبضة ضوئية تنتقل من القمر إلى الأرض بسبب وجود هواء في جو الأرض بدلًا من الفراغ ؟

17 اعتقد نيوتن أن الضوء مكون من جسيمات ، وأن « جسيمات الضوء » هذه تجذب بشدة بواسطة سطح الماء عندما ينتقل الضوء من الهواء إلى الماء . كيف يؤدى هذا إلى الأثر الذى نلاحظه للانكسار ؟

18 تخصص عادة غرفة خاصة في العديد من متاحف العلوم (وكذلك في بعض الأماكن غير المتوقعة) بحيث يمكن لشخص أن يهمس في إحدى النقط الخاصة بها فيسمع بوضوح في نقطة معينة بعيدة . فكيف يجب أن تشيد هذه الغرفة حتى يتم إنجاز هذا التأثير ؟

مسائل

الأقسام من 1-23 إلى 4-23

1 ينعكس شعاع ليزر صادر من الأرض إلى الأرض مرة أخرى بواسطة مرآة مثبتة على مكوك فضائي يبعد عن الأرض بنحو 4.2×10^6 m . ما الزمن الذى يستغرقه الشعاع فى رحلته ذهابًا وإيابًا ؟

2 ينعكس شعاع رادار من سحب مطيرة تبعد 30 km عن محطة الإرسال . ما الزمن الذى تستغرقه موجات الرادار لتقطع المسافة جيئة وذهابًا ؟

3 لكثير من آلات التصوير علامات تدل على التركيز فى بؤرة وتدل هذه العلامات على المسافة بين الجسم وآلة التصوير . افترض أنك تريد أن تلتقط صورة لنفسك فى مرآة مستوية . فإذا كنت أنت وآلة التصوير على بعد 50 cm من المرآة . فما هى القيمة التى تضبط عليها مقياس المسافات فى آلة التصوير لديك ؟

4 ينوى أحد مصممى الديكورات الداخلية تثبيت مرآة حائطية مستوية بحيث يستطيع شخص طوله 1.8 m أن يرى طوله كاملاً فى المرآة . ما هو أقصر طول للمرآة فى هذه الحالة ، وما هو ارتفاع الحد السفلى للمرآة فوق سطح الأرض الذى يضمن هذا ؟

5 إذا كنت تتحرك نحو مرآة مستوية بسرعة مقدارها 1.2 m/s . فما هى السرعة التى تقترب بها من صورتك فى المرآة ؟

6 ينعكس شعاع ضوئى مرتدًا على نفسه من مرآة عمودية على الشعاع . ثم أديرت المرآة بحيث صنع العمود المقام على سطحها زاوية مقدارها $24°$ مع الشعاع . ما هى الزاوية الجديدة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ؟

7 ينعكس شعاع ضوئى من مرآة مستوية بحيث كانت الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس $64°$. (أ) إذا أديرت لكى تزيد زاوية السقوط بمقدار $3°$ فكم تصبح الزاوية الجديدة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ؟ (ب) وإذا حركت المرآة لخفض زاوية السقوط بمقدار $2°$ فكم تصبح الزاوية الجديدة بين الشعاع الساقط والشعاع المنعكس ؟

8 وضع جسم بين مرآتين مستويتين متوازيتين فتكون له عدد لا نهائى من الصور . فإذا كانت المسافة بين المرآتين 50 cm والجسم موضوع فى منتصف المسافة بينهما ، فما هو بعد الصور الخمسة الأولى عن الجسم ؟

■ 9 يقف شخص ما فى غرفة بها مرآتان مستويتان ومتوازيتان مثبتتان على جدارين متقابلين . فإذا كان الشخص يبعد 6 ft عن إحدى المرآتين و 12 ft عن المرآة الأخرى ، فما هى المسافة بين هذا الشخص والصور الثلاث الأولى التى تظهر فى المرآة الأولى ؟

10 وضعت مرآتان فوق منضدة وكانتا مستويتين وبينهما زاوية قائمة بحيث كانت هناك زاوية مقدارها $90°$ بين السطحين العاكسين . وانعكس شعاع موازٍ لسطح المنضدة بواسطة إحدى المرايا ثم بواسطة الأخرى . إثبت أن اتجاه الشعاع النهائى المنعكس هو عكس اتجاه الشعاع الأصلى الساقط تمامًا .

■ 11 أعيد ترتيب المرآتين فى المسألة رقم 10 بحيث صارت الزاوية المحصورة بينهما هى θ . ثم أسقط شعاع موازٍ لسطح المنضدة على إحدى المرايا بزاوية معينة ثم توالت انعكاساته من المرايا . اثبت أن الزاوية بين الشعاع الساقط والشعاع الخارج هو 2θ .

الأقسام من 5-23 إلى 7-23

12 كونت مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 30 cm صورة لجسم ارتفاعه 2.0 cm ويقع على بعد 45 cm أمام المرآة . (أ) أوجد موضع وحجم الصورة . وهل هى حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟ أعد المسألة عند أبعاد للجسم مقدارها (ب) 30 cm ؛ (جـ) 20 cm ؛ (د) 10 cm . اختبر صحة الإجابات برسم مسار الأشعة .

13 وضع جسم طوله 10 cm على بعد 36 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 20 cm . أوجد موضع وحجم الصورة واذكر ما إذا كانت حقيقية أم تقديرية ، ومعتدلة أم مقلوبة . تحقق من إجاباتك برسم مسار الأشعة .

14 أعد المسألة رقم 13 بالنسبة لأبعاد الجسم التالية (أ) 20 cm ، (ب) 16 cm ، (جـ) 6 cm .

15 وضعت عملة معدنية قطرها 2.0 cm أمام مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 30 cm . أوجد موقع وحجم صورة العملة . هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟

16 تكونت صورة تقديرية على بعد 15 cm من مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 30 cm . أوجد موقع الجسم .

17 يستخدم أحد أطباء الأسنان مرآة مقعرة بعدها البؤرى 25 mm . ما هو التكبير الذى تحدثه عندما تثبت على بعد 16 mm من ضرس ما .

18 استخدمت مرآة مقعرة بعدها البؤرى 120 cm لتكوين صورة حقيقية لجسم ما . (أ) أين يجب وضع الجسم إذا كان بعد الجسم مساوٍ لبعد الصورة ؟ (ب) هل الجسم والصورة متراكبان ؟ (جـ) ما مقدار التكبير ؟

19 أين يجب وضع جسم ما أمام مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 1.00 m . إذا أريد للصورة أن تكون حقيقية وحجمها ضعف حجم الجسم ؟

20 أين يجب وضع الجسم فى المسألة السابقة إذا أريد للصورة أن تكون تقديرية وحجمها ضعف حجم الجسم ؟

▪ 21 أين يجب وضع جسم ما إذا كانت الصورة التى تكونها مرآة مقعرة تبعد عن المرآة بمسافة تبلغ ثلث (1/3) بعد الجسم عن المرآة ؟ هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟

▪ 22 تتكون لجسم ارتفاعه 2 cm صورة تقديرية ارتفاعها 5 cm عندما يوضع على بعد 3 cm من مرآة مقعرة . ما هو البعد البؤرى للمرآة ؟

▪ 23 لديك مرآة مقعرة نصف قطر انحنائها 60 cm . عين موضع جسم ستكون صورته مقلوبة وحجمها ثلاثة أمثال حجم الجسم .

▪ 24 أوجد بعد الجسم فى المسألة رقم 23 إذا كانت صورته معتدلة وحجمها ثلاثة أمثال حجم الجسم .

القسم 8-23

25 (أ) أوجد موضع وحجم وطبيعة (أى حقيقية أم تقديرية ، معتدلة أم مقلوبة) الصورة التكونة عندما يوضع جسم ارتفاعه 3 cm على بعد مقداره 50 cm من مرآة محدبة نصف قطر انحنائها 25 cm . أعد المسألة لأبعاد الجسم التالية : (ب) 20 و (جـ) 10 cm . تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة .

26 ما هو موضع صورة جسم موضوع على بعد 48 cm أمام مرآة محدبة بعدها البؤرى 24 cm ؟ ما هو مقدار التكبير ؟ هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

▪ 27 تكونت صورة تقديرية بواسطة مرآة محدبة بعدها البؤرى 40 cm . (أ) أين يجب وضع جسم ما إذا أريد أن تكون الصورة أصغر مرتين من الجسم ؟ (ب) هل من الممكن أن نحصل على صورة تقديرية أكبر من الجسم باستخدام هذا النوع من المرايا .

▪ 28 تكونت صورة تقديرية حجمها ثلث حجم جسم ما بواسطة مرآة محدبة بعدها البؤرى 40 cm . أوجد موقع الجسم وموقع الصورة .

29 تلزم مرآة محدبة بعدها البؤرى 20 cm لتكوين صورة تبعد 12 cm عن المرآة . فكم يجب أن يكون بعد الجسم ؟ وما هو التكبير ؟

▪ 30 ما هو بعد الجسم إذا كانت الصورة المتكونة بواسطة مرآة محدبة تبعد عن المرآة مسافة تبلغ نصف بعد الجسم ؟ ما مقدار التكبير ؟

▪ 31 تستخدم مرآة محدبة ذات زاوية واسعة ونصف قطر انحنائها 0.50 cm فى محل للبقالة لمراقبة الممرات . أوجد موضع صورة أحد العملاء الواقفين فى أحد الممرات على بعد 8.0 m من المرآة . وطبيعة تلك الصورة . ما هو التكبير ؟

32 يبلغ قطر إحدى كرات الزينة فى شجرة عيد الميلاد 8.0 cm . (أ) ما هو موضع صورة طفل يقف على بعد 80 cm من الكرة اللامعة ؟ (ب) ما هو تكبير الصورة ؟

القسم 23-9

33 الطول الموجي للضوء الأصفر المنبعث من مصباح صوديوم قوسي 589 nm . وعندما يعبر شعاع من هذا الضوء خلال الإيثانول فكم تبلغ . (أ) سرعته ، (ب) طوله الموجي ، و (جـ) تردده ؟

34 الطول الموجي للضوء الأزرق المنبعث من الزئبق هو 436 nm . وعندما يخترق شعاع من هذا الضوء الماء فكم تكون . (أ) سرعته ، (ب) طوله الموجي ، (جـ) تردده .

35 يخترق شعاع من الضوء الأحمر المنبعث من ليزر هليوم ـ نيون ($\lambda = 633$ nm) لوحًا من الزجاج ($n = 1.56$) بزاوية مقدارها $30°$ مع العمود . (أ) ما هي سرعة الشعاع داخل الزجاج ؟ (ب) وما هو طوله الموجي ؟ (جـ) وما هي الزاوية التي يصنعها مع العمود داخل الزجاج ؟

36 يدخل إلى الماء شعاع من الضوء الأخضر طوله الموجي $\lambda = 546$ nm بزاوية مقدارها $60°$ مع العمود المقام على سطح الماء . (أ) ما هو الطول الموجي لهذا الضوء داخل الماء ؟ (ب) ما مقدار الزاوية التي يصنعها الشعاع المار داخل الماء مع العمود ؟

37 يدخل ضوء لوحًا زجاجيًا مسطحًا ($n = 1.56$) بزاوية مقدارها $48°$ مع العمود المقام على السطح العلوي . (أ) ما هي زاوية الانكسار داخل اللوح الزجاجي ؟ (ب) وبعدما يخرج الشعاع من السطح السفلي للوح ، ما هي الزاوية المحصورة بينه وبين الشعاع الأصلي الساقط على اللوح ؟

38 ما هي المسافة التي يقطعها شعاع من الضوء داخل الماء ($n = 1.33$) إذا كان يقطع في نفس الفترة الزمنية 1 m في الزجاج ($n = 1.56$) ؟

39 يتغير معامل انكسار الزجاج تغيرًا طفيفًا عند تغير الطول الموجي للضوء ، حيث يبلغ معامل انكسار زجاج فلنت 1.650 للضوء الأزرق ($\lambda = 430$ nm) و 1.615 للضوء الأحمر ($\lambda = 680$ nm) . سقط شعاع مكون من هذين اللونين على لوح من زجاج فلنت بزاوية سقوط مقدارها $45°$. أوجد الزاوية المحصورة بين الشعاعين الملونين داخل الزجاج .

40 ما مقدار الزاوية التي يسقط بها شعاع من الضوء على سطح مستو للوح زجاجي ($n = 1.56$) إذا كان الشعاع المنكسر متعامدًا مع الشعاع المنعكس ؟

41 لاحظ أحد السابحين في حمام للسباحة أن شعاعًا من ضوء الشمس يعمل داخل الماء زاوية مقدارها $27°$ مع الخط الرأسي . ما هي زاوية سقوط الشعاع في الهواء على سطح الماء . اعتبر سطح الماء مستويًا وأفقيًا .

42 يسقط شعاع ضوئي بزاوية مقدارها $24°$ على سطح سائل ما . فإذا كان الضوء ينتقل خلال ذلك السائل بسرعة مقدارها 2.3×10^8 m/s . فما هي زاوية انكسار الشعاع داخل السائل ؟

43 ينفذ شعاع ضوئي من الماء إلى مادة شفافة بزاوية $36°$ مع العمود . ويصنع الشعاع المنكسر داخل المادة الشفافة زاوية مقدارها $24°$. ما هي سرعة الضوء داخل المادة الشفافة ؟ اعتبر سطح الاتصال بين الماء والمادة الشفافة مستويًا ومسطحًا .

■ 44 يبعد غواص يستخدم جهاز تنفس تحت الماء مسافة أفقية مقدارها 280 m بعيدًا عن الشاطئ وعلى عمق 90 m تحت سطح الماء . ويطلق الغواص شعاع ليزر نحو سطح الماء بحيث يرتطم الشعاع بسطح الماء عند نقطة تبعد 190 m عن الشاطئ . ثم يصل الشعاع بعد انكساره إلى قمة مبنى قائم على حافة الماء على الشاطئ . ما هو ارتفاع المبنى ؟

■ 45 وضعت قطعة نقود معدنية في قاع حمام سباحة . وعندما ينظر إليها شخص ما من فوقها مباشرة فإن عمقها تحت السطح يبدو 2.4 m . ما هو العمق الحقيقي للحمام ؟

القسم 23-10

46 ينبعث شعاع ضوئي من مصدر يقع على عمق 4 m تحت سطح بركة ماء ساكنة ، إلى أعلى نحو السطح . ما هي أقصى زاوية يمكن أن يصنعها الشعاع في الماء مع الخط الرأسي إذا كان جزء من الحزمة الضوئية قادرًا على النفاذ إلى الهواء ؟

47 ما هى الزاوية الحرجة للضوء داخل قطعة من الألماس معامل انكسارها 2.42 عندما . (أ) يحاط الألماس بالهواء و (ب) يغمس الألماس فى الماء ؟

48 الزاوية الحرجة لمعدن ما محاط بالهواء هى 41° . ما هى سرعة الضوء فى المعدن ؟

49 يسقط شعاع ضوئى من الهواء إلى سطح سائل ما . وكانت زاوية السقوط 36° وزاوية الانكسار داخل السائل 25° أوجد الزاوية الحرجة للسائل بالنسبة إلى الهواء .

■ 50 ملئ حوض للأسماك على هيئة متوازى مستطيلات بالماء وكانت حوائطه عبارة عن جدران زجاجية رأسية مسطحة من مادة بلاستيكية شفافة معامل انكسارها 1.6 . ما هى أقصى زاوية سقوط بالنسبة لشعاع ضوئى داخل الماء يرتطم بها الشعاع على الجدران البلاستيكية ويخرج إلى الهواء الخارجى ؟

■ 51 يبلغ معامل انكسار ليفة بلاستيكية تستخدم فى نقل إشارة عبر الألياف البصرية 1.45 . ما هى أدنى زاوية سقوط بالنسبة للعمود المقام على الجدران الأسطوانية لليفة وتحدث انعكاسًا داخليًا إذا كانت الليفة فى (أ) الهواء و (ب) الماء .

■ 52 وضع مصباح فى منتصف قاع بركة سباحة كبيرة عمقها 2.0 m . ويشع المصباح ضوءه فى جميع الاتجاهات . ويبدأ رجل من نقطة تقع فوق المصباح مباشرة فى التجديف وهو فى قارب (كانو) إلى أن يختفى المصباح من ناظريه . ما هى المسافة التى جدفها وهو بالقارب ؟ اعتبر أن جوانب البركة لا تعكس الضوء .

القسمان 11-23 و 12-23

53 كونت عدسة مجمعة بعدها البؤرى 40 cm صورة لجسم ارتفاعه 2.0 cm . أوجد موضع وحجم وطبيعة الصورة عندما يكون بعد الجسم هو (أ) 100 cm ، (ب) 60 cm و (جـ) 30 cm . تحقق من إجاباتك برسم مسار الأشعة .

54 أوجد موضع وحجم وطبيعة الصورة التى تكونها عدسة مفرقة بعدها البؤرى 30 cm- إذا كان الجسم الذى ارتفاعه 2.0 cm موضوعًا على بعد (أ) 80 cm ، (ب) 50 cm ، (جـ) 15 cm . تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة .

55 تكونت صورة لتمثال صغير ارتفاعه 4.0 cm بواسطة عدسة مفرقة بعدها البؤرى 40 cm- . أوجد موضع وطبيعة الصورة وتكبيرها عند الأبعاد التالية للجسم : (أ) 90 cm ، (ب) 40 cm ، (جـ) 15 cm . تحقق باستخدام رسم مسار الأشعة .

56 تستخدم عدسة مجمعة بعدها البؤرى 45 cm لتكوين صورة لجسم ارتفاعه 3 cm . أوجد موضع وحجم وطبيعة صورة جسم موضوع على بعد : (أ) 120 cm ، (ب) 90 cm ، (جـ) 20 cm . تحقق برسم مسار الأشعة .

57 تكونت صورة تقديرية لجسم موضوع على بعد 40 cm من عدسة على مسافة 20 cm من العدسة . (أ) ما هو البعد البؤرى للعدسة ؟ (ب) هل العدسة مجمعة أم مفرقة ؟

58 وضع جسم على بعد 60 cm إلى يسار عدسة مفرقة . وقد تكونت الصورة على بعد 30 cm إلى يسار العدسة . عين البعد البؤرى للعدسة . ما هو التكبير ؟

59 استخدمت عدسة مجمعة بعدها البؤرى 2.4 cm لفحص عينة بيولوجية موضوعة فوق شريحة مجهر (ميكروسكوب) . وقد كونت العدسة صورة للعينة على بعد 12.6 cm من الشريحة . ما هى المسافة بين العدسة والشريحة إذا كانت الصورة : (أ) حقيقية و (ب) تقديرية ؟

■ 60 كونت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 30 cm- صورة تقديرية بعدها عن العدسة هو نصف بعد الجسم . (أ) ماذا يجب أن يكون بعد الجسم ؟ ما هو طول الصورة بالنسبة إلى ارتفاع الجسم ؟

■ 61 (أ) أين يجب وضع جسم ما بالنسبة لعدسة مجمعة إذا كانت الصورة تبلغ ثلث (1/3) حجم الجسم ؟ (عبر عن إجاباتك بدلالة البعد البؤرى f للعدسة) ؛ (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟

▪ 62 استخدمت عدسة مفرقة لتكوين صورة حجمها نصف حجم الجسم . أوجد موضع الجسم بدلالة البعد البؤرى للعدسة .

▪ 63 يراد استخدام عدسة منفردة لتكوين صورة تقديرية لجسم بحيث يكون طولها ثلاثة أمثال طول الجسم . (أ) ما نوع العدسة الواجب استخدامها ؟ (ب) أين يجب وضع الجسم ؟ (عبر عن الإجابة بدلالة البعد البؤرى للعدسة f) .

▪ 64 وضع جسم على بعد $8f$ من عدسة مفرقة بعدها البؤرى f . (أ) أوجد موضع الصورة . (ب) ما هو التكبير ؟

▪ 65 أعد المسالة رقم 64 بالنسبة لعدسة مجمعة .

القسم 13-23

66 وضعت عدستان مجمعتان بعد كل منهما البؤرى $f = 30$ cm بحيث كانت المسافة بينهما 80 cm (أ) أوجد البعد النهائى لصورة جسم موضوع على بعد 100 cm أمام العدسة الأولى . (ب) ما مقدار التكبير الكلى للمجموعة ؟ (جـ) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

67 وضع جسم على بعد 15 cm أمام عدسة مجمعة بعدها البؤرى 10 cm . ثم وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 8 cm- على بعد 50 cm بعد العدسة الأولى . (أ) أوجد الموضع النهائى وتكبير الصورة المتكونة بواسطة المجموعة . (ب) هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

68 وضعت عدسة مجمعة بعدها البؤرى 24 cm على بعد 36 cm أمام عدسة مفرقة بعدها البؤرى 36 cm- . ثم وضع جسم صغير على بعد 6 cm أمام العدسة المجمعة . أوجد (أ) موضع ، (ب) تكبير الصورة النهائية .

69 وضع جسم ارتفاعه 1 cm على مسافة 6 cm إلى يمين عدسة مجمعة بعدها البؤرى 12 cm . ثم وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 24 cm- على مسافة 10 cm إلى يسار العدسة المجمعة . أوجد موضع وحجم الصورة النهائية . وهل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟

70 وضعت عدستان مجمعتان بعداهما البؤريين هما 10 cm ، 20 cm على الترتيب بحيث كانت المسافة بينهما 50 cm . ويراد تكوين صورة لجسم بين العدستين وعلى مسافة 30 cm أبعد من العدسة الأولى . (أ) أين يجب وضع الجسم حتى تتكون له تلك الصورة ؟ (ب) ما هو التكبير النهائى ؟ (جـ) هل الصورة النهائية معتدلة أم مقلوبة ؟

مسائل عامة

(تتعلق المسألتان 71 ، 72 بمعادلة صانع العدسات . راجع الملحوظة الدونة بالقسم 11-23) .

▪ 71 افترض إنك صنعت عدسة ثنائية التحدب من زجاج فلنت وكان نصفا قطر انحناء سطحيها هما $R_1 = 100$ cm ، $R_2 = 200$ cm . (أ) ما هو البعد البؤرى للعدسة إذا كانت موجودة فى الهواء ؟ (ب) وإذا كانت محاطة بالماء .

▪ 72 البعد البؤرى لعدسة مفرقة هو 55 cm- عندما تكون مغمورة فى البنزين . وبعدها البؤرى عندما تكون محاطة بالهواء هو 15 cm- . فإذا كان السطح الأمامى مسطحًا ($R_1 = \infty$) فما هو نصف قطر انحناء السطح الخلفى؟

▪ 73 وضع حجر ملون فى قاع حوض مستطيل مملوء بالبنزين . وكان العمق الظاهرى للحجر عندما يرى مباشرة من أعلى هو 40 cm . ما هو العمق الحقيقى للحوض ؟

▪ 74 وضع جسم على بعد 60 cm من حائل . ثم وضعت عدسة مجمعة بين الجسم والحائل لتكوين صورة للجسم على الحائل . فإذا كان البعد البؤرى هو 12 cm فأوجد . (أ) موضع العدسة و (ب) التكبير النهائى . هل هناك أكثر من إجابة للجزءين (أ) و (ب) .

▪ 75 إثبت أن معادلتى المرآة والعدسة يمكن التعبير عنهما بشكل بديل على الصورة : $s_i s_o = f^2$ ، حيث s_o و s_i هما بعدا الجسم والصورة عن البؤرة .

76 وضع جسم على بعد D من حائل . ثم استخدمت عدسة مجمعة لتكوين صورة للجسم على الحائل . اثبت أنه يوجد موقعان للعدسة على مسافة x من الجسم بحيث :

$$x = \frac{1}{2}D\left(1 \pm \sqrt{1-\frac{4f}{D}}\right)$$

وتحت أية ظروف لن تتكون صورة على الإطلاق ؟

77 وضع جسم على بعد 40 cm أمام عدسة مجمعة بعدها البؤرى 30 cm وتقع بدورها على بعد 60 cm أمام مرآة مستوية . أوجد جميع الصورة المتكونة بواسطة هذه المجموعة واذكر ما إذا كانت كل منها حقيقية أم تقديرية .

78 وضعت عدسة مفرقة بعدها البؤرى 10 cm- على مسافة 20 cm إلى اليسار من مرآة كرية مقعرة نصف قطر انحنائها 25 cm . فإذا وضع جسم على بعد 10 cm إلى اليسار من العدسة ، فأوجد كل الصور المتكونة بواسطة المجموعة واذكر ما إذا كانت كل منها حقيقية أم تقديرية .



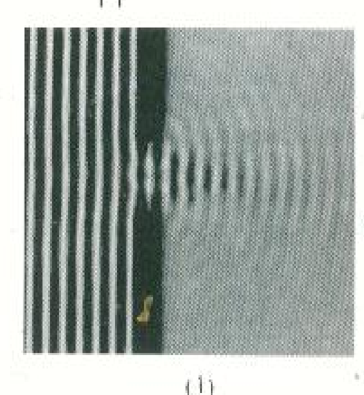
درسنا فى الفصل السابق سلوك العدسات والمرايا مستخدمين مفهوم الأشعة الضوئية ، ولم نكن بحاجة لأن نعرف ما إذا كان الضوء مكونًا من جسيمات أو موجات حتى نكمل دراستنا . إلا أن هذا ليس صحيحًا بالنسبة للموضوعات التى سنتناولها فى هذا الفصل . فسوف نرى أن الطبيعة الموجية للضوء تؤدى إلى ظواهر التداخل التى تشبه كثيرًا ما قابلناه عند دراسة الحركة الموجية الميكانيكية كالصوت والموجات المتكونة على وتر مشدود . إن مجرد وجود هذه الظواهر وتأثيرات أخرى سنقوم بدراستها أيضًا فى هذا الفصل ، كفيل بأن يجعلنا نتقبل الطبيعة الموجية للضوء .

24-1 مبدأ هيجنز والحيود

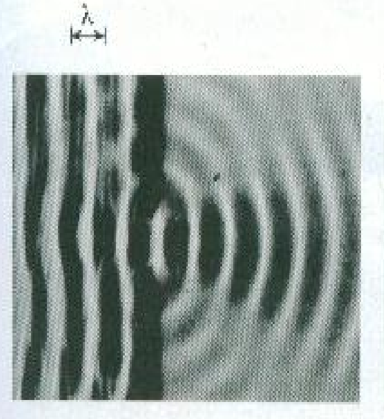
هل تسنى لك أن تراقب موجات المياه الهادئة وهى ترتطم برفق بإحدى الدعامات أو بأى عائق فى طريقها ؟ لو حدث ذلك فلابد إنك لاحظت أن الموجات تبدو كما لو كانت تنحنى حول الدعامة بدلاً من تكوين ظل واضح لها . وهناك حالة مناظرة لهذا كالمبينة فى الشكل 1-24 حيث نرى موجات مائية مستوية تم إثارتها بواسطة حوض التموجات

وترتطم الموجات بحاجز به ثقب صغير ، ثم تمر الموجات خلال الثقب وتنتشر لكي تملأ المنطقة الواقعة خلف الحاجز .

ويمكن ملاحظة هذا النوع من السلوك لا في حالة موجات المياه فحسب وإنما أيضًا في حالة موجات الصوت والموجات الكهرومغناطيسية . إنه سلوك مميز للموجات ويطلق عليه اسم خاص وهو الحيود :



قمة الموجة



اتجاه حركة الموجات

(أ) (ب) (جـ)

شكل 1-24:
موجات مائية مستوية تسقط على ثقب فى حاجز . ويتسبب الحيود فى جعل الموجات تنتشر فى المنطقة الواقعة وراء الحاجز كلها . ويلاحظ أنه عندما يصير الطول الموجى λ مساويًا بالتقريب لقطر الثقب فإن الحيود يكون أكثر وضوحًا .

تستطيع الموجات أن تنحنى فيما وراء العوائق وتسمى هذه الظاهرة **الحيود** . وبعبارة أخرى فإن العوائق لا تتشكل لها ظلال حادة تمامًا بواسطة الموجات الساقطة .

وقد لجأ كريستيان هيجنز ـ وهو أحد معاصرى نيوتن ـ أن يفترض ما يعرف الآن **بمبدأ هيجنز** لكي يفسر الحيود :

تعمل كل نقطة فى جبهة الموجة كمصدر لمويجات صغيرة تنتشر فى جميع الاتجاهات من تلك النقطة وذلك بسرعة الموجات فى الوسط .

وجزء من قمة الموجة المبينة فى الشكل 1-24 ، مثلاً ، يرتطم بالثقب الصغير فى الحاجز مكونًا مصدرًا موجيًا جديدًا . ونتيجة لذلك تنتشر الموجات نحو الخارج من الثقب حتى تملأ كل المنطقة الواقعة خلف الحاجز .

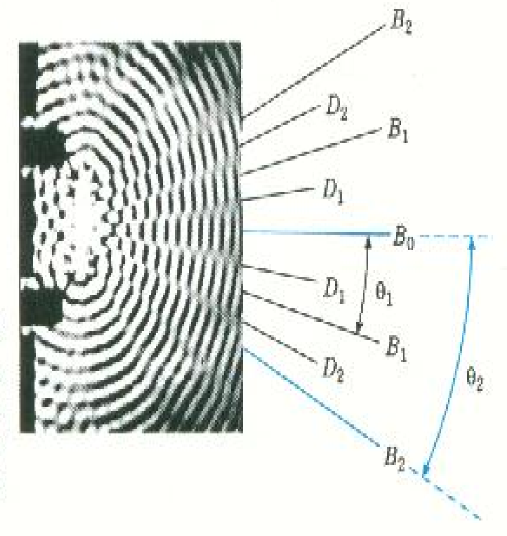
ويبدو كما لو كان الحيود لا يتفق مع ما نعرفه حول الموجات الضوئية وذلك لأن الأشياء التى تقف فى مسار الضوء تتكون لها ظلال من السهل رؤيتها . وقد يكون حل هذا التناقض كامنًا فى الشكل 1-24 . ويلاحظ أنه فى الجزء (أ) من الشكل يكون الطول الموجى λ نحو ثلث عرض الثقب تقريبًا وتنتشر الموجات داخل منطقة الظل بشكل طفيف فحسب . أما عندما يصبح الطول الموجى أكبر من ذلك كما فى الجزء (جـ) فإن الموجات تنتشر داخل منطقة الظل بشكل أوسع . وسوف نرجع إلى هذه الظاهرة فيما بعد .

24-2 التداخل

يصور الشكل 2-24 تجربة شيقة تتضمن التعامل مع موجات الماء . حيث يعمل مذبذبان كمصدرين نقطيين يبعثان بمجموعتين من موجات الماء المتماثلة على طول

سطح الماء . وعلينا ملاحظة ما يحدث عندما تتلاقى الموجات المنبعثة من المصدرين وتتفاعل معًا . فعلى امتداد خطوط معينة تنطلق من منتصف المسافة بين المصدرين (يرمز لها بالرمز B) يخلق التفاعل قممًا موجية كبيرة جدًا ، بينما لا ترى أية قمم موجية على طول خطوط أخرى (يرمز لها بالرمز D) . ويبدو أن الموجات المنطلقة من المصدرين يقوى بعضها بعضًا عند نقط معينة ويلغى بعضها بعضًا عند نقط أخرى . وسنبحث الآن فى أصل هذه الظاهرة .

نذكر من الفصلين الرابع عشر والخامس عشر أن الموجات المتشابهة إما أن يقوى بعضها بعضًا . وإما يلغى بعضها بعضًا . ولكى نسترجع هذه الحقيقة سنعتبر أن لدينا موجتين A و B كما فى الشكل 3-24 . والموجتان المرسومتان فى الجزء (أ) متفقتان فى الطور أى أن قمة تقع فوق قمة وقاع يقع فوق قاع . وعندما تجمع الموجتان فإن الموجة المحصلة ستكون ضعف أى من الموجتين الأصليتين . إن الموجتين المبينتين فى (أ) تمران **بتداخل بنَّاء** .



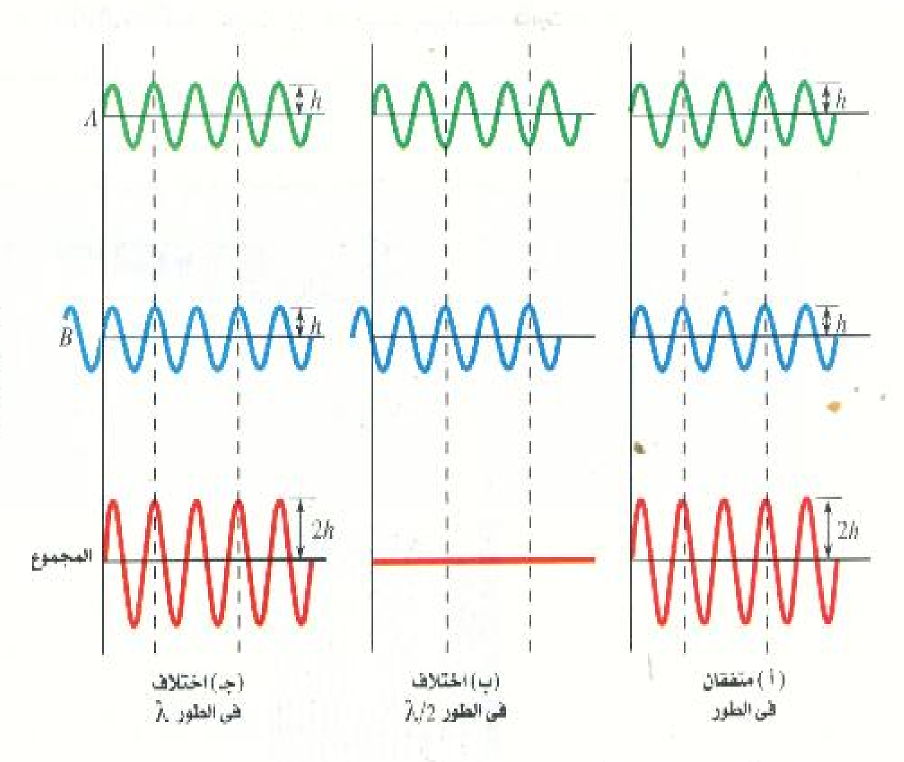
شكل 2-24:
يبعث المصدران المتزامنان موجات مائية متماثلة تتداخل بشكل بنَّاء على طول الخطوط المميزة بالحرف B وبشكل هدَّام على طول الخطوط المميزة بالحرف D .

أما الموقف المبين فى الجزء (ب) فهو مختلف تمامًا ، حيث تأخرت الموجة B بمقدار نصف طول موجى ، $\lambda/2$ ، بحيث تقع قمة فوق قاع بالنسبة للموجتين ، أى أن اختلاف الطور بين الموجتين هو $\lambda/2$ أو $180°$. ولذلك تلغى إحداهما الأخرى عند إجراء عملية الجمع وتكون الموجة المحصلة لهما صفرًا . ويقال فى هذه الحالة أن الموجتين تمران **بتداخل هدَّام** .

الجزء (جـ) من الشكل يصور تخلف الموجة B عن الموجة A بمقدار طول موجى كامل ، λ . وهكذا فالفرق فى الطور بين الموجتين هو λ أو $360°$ ، ويقع قاع فوق قاع وقمة فوق قمة وتجمع الموجتان لتؤديا إلى موجة محصلة أكبر مرتين من أى من الموجتين . . أى أن الموجتين تتداخلان بشكل بنَّاء .

نستنتج بشكل عام (كما فعلنا من قبل فى حالة الموجات الميكانيكية) **أن موجتين متماثلتين تتداخلان بشكل بنَّاء إذا كانتا متطاورتين (فى نفس الطور) وإذا كانت** إحداهما متأخرة بمسافة مقدارها λ ، 2λ ، 3λ ، إلخ بالنسبة للموجة الأخرى فإنهما

ستظلان تقوى إحداهما الأخرى عندما تجمعان وذلك لأن كل قمة ستظل واقعة فوق قمة . أما إذا كان التأخر النسبى هو $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ ، إلخ فإن قمة سوف تقع فوق قاع وتتداخل الموجتان بشكل هدَّام ؛ أى أن إحداهما تلغى الأخرى .



شكل 3-24:
يمكن لموجتين متماثلتين إما أن تقوى إحداهما الأخرى أو تلغيها اعتماداً على الطور النسبى بينهما .

وسنعود الآن إلى مناقشة التأثير الناتج عند اندماج مصدرين موجيين ، ونريد أن نكتشف السبب فى أن الموجات المنبعثة من هذين المصدرين تقوى فى مناطق معينة وتلغى فى مناطق أخرى . ومن السهل تناول هذه المسألة إذا رجعنا إلى الشكل 4-24 ، حيث يقع المصدران عند A و B ويرسلان موجات متماثلة فى جميع الاتجاهات . دعنا نعتبر أولاً الموجات التى يبعثان بها فى الاتجاه الأفقى ؛ كما فى الجزء (أ) . هذه الموجات متفقة فى الطور ، أى أن قمة تقع فوق قمةً وقاعًا فوق قاع ولهذا فهى تقوى بعضها البعض ؛ وهذا هو السبب فى التقوية الحادثة على طول الخط B_0 فى الشكل 2-24 .

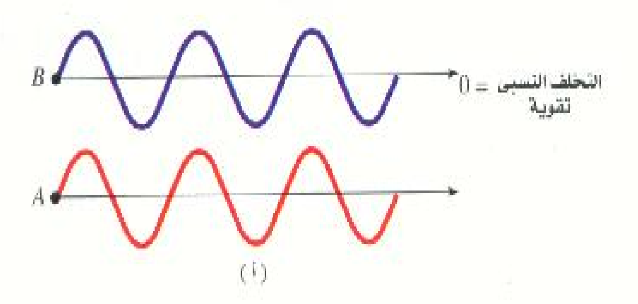
ثم لنعتبر الموجات المُرسلة فى الاتجاه المبين فى الشكل 4-24 (ب) ، حيث تتأخر الموجة الصادرة من B بمقدار $\lambda/2$ بالنسبة للموجة القادمة من A بحيث تقع قمم إحدى الموجتين فوق قيعان الموجة الأخرى . ونتيجة لذلك تتلاشى الموجات الصادرة عن المصدرين فى هذا الاتجاه ؛ مثلما يحدث على طول الخطين المميزين بالحرف D_1 فى الشكل 2-24 (عليك أن تفسر سبب وجود خطين مميزين بالحرف D_1) .

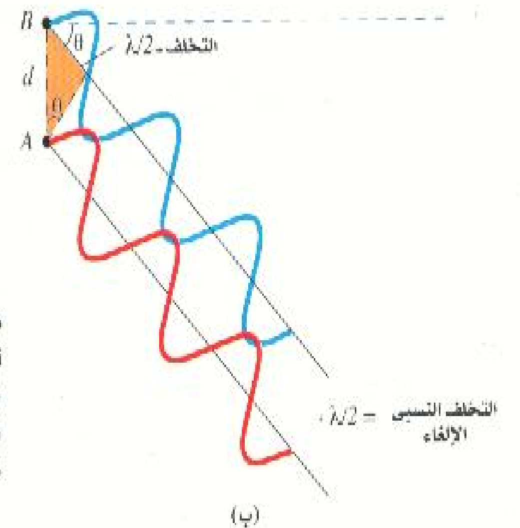
وإذا زادت الزاوية θ فى الشكل 4-24 فإن الموجة B ستتأخر أكثر فأكثر بالنسبة للموجة A ولكن عندما تزداد θ وبالتالى التخلف النسبى حتى يصبح التخلف بين الموجتين مساويًا لطول موجى λ فإن كلاً من الموجتين تقوى الأخرى مرة ثانية ، مثلما يحدث على طول الخطوط B_1 فى الشكل 2-24 .

ويمكنك إذا سرت على هذا المنوال من الاستدلال المنطقى أن تثبت لنفسك أن التخلف

النسبى يكون $3(\lambda/2)$ على طول خطوط الإلغاء D_2 ويكون 2λ على طول خطوط التقوية B_2 . وهكذا فإن B_0 ، B_1 ، B_2 وكل الخطوط المماثلة تمثل خطوطا تقوى فيها الموجات بعضها بعضًا . ويكون التخلف النسبى على طول هذه الخطوط هو 0 ، λ ، 2λ وهكذا .

سنقوم الآن باشتقاق معادلة رياضية تعبر عن الزوايا التى تحدث عندها خطوط التقوية ولهذا سنفحص المثلث الصغير المظلل فى الشكل 4-24 .





شكل 4-24:
تحدث التقوية عند الزوايا التى يكون التخلف فيها مساويًا λ ، 2λ ، 3λ . إلخ أما الإلغاء فيحدث عندما يكون التخلف النسبى هو $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ ، إلخ . .

يلاحظ أن الزاوية θ فى هذا المثلث مساوية للزاوية θ التى بين الأشعة والخط الأفقى وندرك على الفور من المثلث المظلل ـ أن

$$\text{التخلف النسبى} = d \sin \theta$$

حيث d هى المسافة بين المصدرين .

ولكى نحسب قيم الزوايا التى تحدث عندها تقوية ، علينا تذكر أن التخلف النسبى فى حالة التقوية لابد وأن يساوى 0 ، λ ، 2λ ، 3λ أو بشكل عام $n\lambda$ حيث n رقم صحيح . وعلى ذلك إذا كانت θ_n هى الزاوية التى تناظر تخلفًا نسبيًا مقداره $n\lambda$ فإن :

$$n\lambda = d \sin \theta_n \qquad (24\text{-}1)$$

فعلى سبيل المثال ، فإن $n = 0$ على طول الخط B_0 فى الشكل 2-24 (لأن الموجتين لا تتخلفان بالنسبة لبعضهما البعض ، ومن ثم $0 = d \sin \theta_0$ و $\theta_0 = 0$. ولدينا بالمثل $n = 2$ على طول الخط B_2 ولذلك $2\lambda = d \sin \theta_2$.

مثال توضيحي 1-24

افترض أن المسافة بين المصدرين المبينين في الشكل 2-24 هو 2.0 cm وأن الطول الموجي هو 0.70 cm . ما هي الزاوية التي يحدث عندها خط التقوية B_2 ؟

استدلال منطقي : نعلم أن $d = 2.0$ cm وأن $\lambda = 0.70$ cm ويهمنا أن نعرف الموقف عندما $n = 2$. بالتعويض في المعادلة (1-24) نجد :

$$\sin\theta_2 = \frac{(2)(0.70\text{ cm})}{2.0\text{ cm}} = 0.70$$

ونجد منها أن $\theta_2 = 44°$ ، أي أن الخطوط B_2 ستصنع زوايا مقدارها $44°$ مع الخط الأفقي .

تمرين : عند أية زاوية يوجد الخط B_1 ؟ **الإجابة :** $20.5°$.

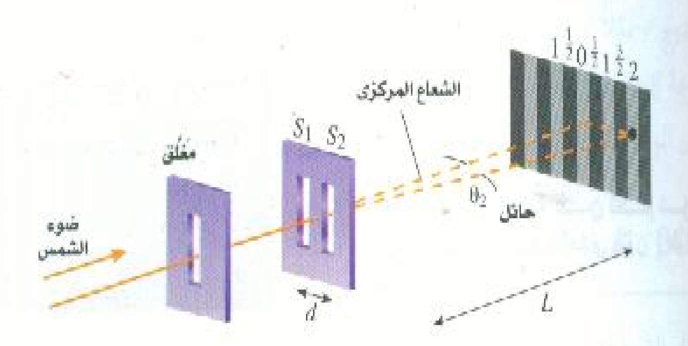
3-24 تجربة الشق المزدوج ليونج

ليست التجربة التي وصفناها في القسم 2-24 حول تداخل موجات منتشرة من مصدرين ، خاصة بالموجات المائية فحسب . ولعلك تذكر من القسم 8-15 أن شعبتي الشوكة الرنانة يمكن أن يحدثا تداخلاً في موجات الصوت وتفسير هذه الظاهرة شبيه بوصف موجات الماء المتداخلة فيما عدا أن الموجات الصوتية طولية بدلاً من أن تكون مستعرضة . وأية موجات مماثلة ، سواء أكانت مستعرضة أم طولية قادرة على إحداث ظواهر تداخلية .

وقد اعتقد نيوتن ، كما ذكرنا في الفصل الثالث والعشرين ، أن الضوء مكون من جسيمات . لقد صور الضوء على أنه تيار من الجسيمات المنطلقة من مصادر الضوء ، والتي تنتقل في خطوط مستقيمة . وعلى الرغم من أن العالم الإيطالي جريمالدي قد أثبت مبكرًا عام 1660 أن الضوء يمكن أن يعاني من الحيود ، إلا أن نيوتن تمكن من تفسير تلك المشاهدات في إطار جسيمات الضوء . ولم تكن تلك التفسيرات مقنعة تمامًا إلا أن معظم الناس تقبلوها نظرًا لاحترامهم الشديد لشخص نيوتن . وظل الأمر كذلك حتى عام 1803 عندما أصبحت الطبيعة الموجية للضوء مقبولة على نطاق واسع .

ثم نشر العالم الإنجليزي توماس يونج (1773 – 1829) نتائج تجاربه عامي 1803 و 1807 والتي أوضح فيها تداخل الموجات الضوئية . فقد سمح لحزمة دقيقة من ضوء الشمس أن تمر خلال ثقب في مَغْلق نافذة ثم تسقط على شقين ضيقين ومتوازيين تم عملهما في قطعة من الورق المقوى كما هو موضح في الشكل 5-24 . وقد شاهد نمطًا للتداخل مكونًا من مناطق متبادلة مضيئة ومظلمة تسمى **الهدبات** (أو الأهداب) على حائل موضوع خلف الشقين . وقد أتاحت له مشاهداته لهذه الأهداب وكذا تفسيره بأن الضوء ظاهرة موجية ، أن يحسب الطول الموجي للضوء للمرة الأولى . وسنتعرف الآن على الأسلوب الذي اتبعه لعمل ذلك .

إن الجدار الرأسي الموضوع عند الحافة اليمنى للشكل 2-24 هو الذي يُظهر نمطًا للموجات المائية . وتكون قمم موجات الماء عالية عند النقط المميزة بالحرف B ، أما حيث



شكل 5-24:
يعمل الشعاعان s_1 و s_2 كمصدرين للموجتين المتزامنتين فى الطور . وبالنسبة للموجات الضوئية فإن هدبات التداخل عادة ما يفصل بين كل اثنتين منها بضع ملليمترات قليلة . (قارن هذه التجربة مع الشكل 2-24 الخاص بالموجات المائية) .

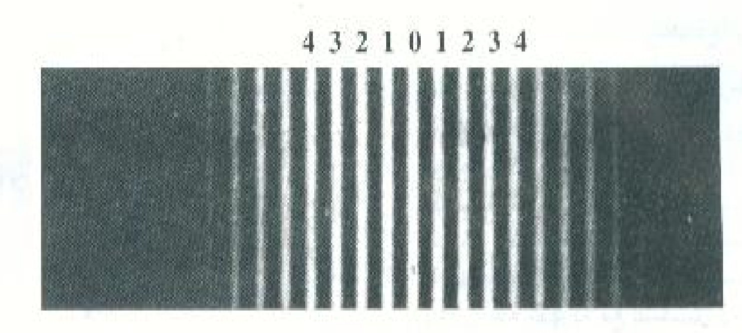
تلتقى الخطوط المميزة بالحرف D بالجدار فإن الماء يكون ساكنًا . والأهداب المضيئة فى الشكل 5-24 تناظر المواقع المميزة بالحرف B فى نمط تداخل الموجات المائية (المتخيل) فى الشكل 2-24 . والمواقع المميزة بالحرف D تناظر ـ كما لعلك قد ظننت ـ الأهداب المظلمة فى نمط الشق المزدوج ليونج .

يمكننا الآن تفسير نمط يونج مستخدمين التناظر مع تجربة تداخل موجات الماء كما يلى . فالشقان يعملان عمل مصدرى الضوء اللذين يبعثان موجات متماثلة . والهدبة المميزة بالحرف O تكون مضيئة لأن الموجات التى تصل إلى هذا الموقع تقوى إحداها الأخرى ويكون التخلف النسبى بينها صفرًا .

أما عند الهدبتين 1 و 2 فإن الموجتين تقويان مرة أخرى . وتنتمى هاتان الهدبتان إلى المنطقتين B_1 و B_2 فى الشكل 2-24 ولهذا فإن فرق الطور النسبى بين الموجتين الواصلتين إلى هناك يكون λ بالنسبة للمنطقة B_1 و 2λ للمنطقة B_2 . وحيث أن الواقف فى الشكلين 2-24 و 5-24 متماثلة تمامًا فإننا نستطيع أن نطبق المعادلة 1-24 هنا على أهداب الشق المزدوج ليونج أو $n\lambda = d \sin \theta_n$ ، حيث n هو رقم الهدبة كما يرمز إليه فى الشكل 5-24 و d هو المسافة بين الشقين ، أما λ فهو الطول الموجى للضوء . ومثلما كانت θ_2 هى الزاوية بين الشعاع الواصل إلى الهدبة المركزية (0) والشعاع الواصل إلى الهدبة 2 فإن θ_n هى الزاوية بين الشعاع المركزى والشعاع الواصل إلى الهدبة n . وكثيرًا ما يطلق على « n » رقم رتبة الهدبة . وطبقًا لهذا الاصطلاح فإن هدبة θ_2 تصبح **هدبة من الرتبة الثانية** .

وهكذا تمكن يونج من استخدام المعادلة 1-24 فى حساب الطول الموجى للضوء . وكان الضوء المستخدم فى التجارب هو ضوء الشمس الذى يحتوى على الأطوال الموجية المرئية . وحيث أن المعادلة 1-24 تقتضى أن يحدث كل طول موجى هدبة مضيئة عند زاوية مختلفة ، لذا فإن هدبات يونج كانت عبارة عن شرائط مكونة من كل ألوان الضوء المرئى حيث الحافة الزرقاء للشريط أقرب ما تكون فى المنتصف بينما تكون الحافة الخارجية حمراء . أما إذا كان الضوء أحادى اللون (أى ذا طول موجى واحد) مثل الذى يوفره الليزر ، فإن الهدبات الناتجة تكون ذات لون واحد ومحددة بشكل واضح كما يبين ذلك الشكل 6-24 .

سنتناول الآن نتائج تجربة نموذجية حيث كانت L فى الشكل 5-24 120 cm ، وكانت المسافة d بين الشقين $d = 0.025$ cm ، أما المسافة بين مركز نمط التداخل إلى



شكل 6-24:
هدبات التداخل الناتجة عن نظام شق مزدوج باستخدام ضوء أحادى اللون (طول موجى منفرد) .

المركز التقريبى للهدبة رقم 2 هو 0.50 cm . ولكى نحسب θ_2 فإننا نرجع إلى الشكل 5-24 فنجد أن :

$$\tan \theta_2 = \frac{\text{المسافة } 0 \leftarrow 2}{L} = \frac{0.50 \text{ cm}}{120 \text{ cm}} = 0.00417$$

ومنها نجد أن $\theta_2 = 0.24°$.

وقد استخدم يونج مثل هذه البيانات لكى يحسب الطول الموجى للضوء بالقرب من مركز هدبة نموذجية ، وقد حصل عند التعويض فى المعادلة 1-24 على :

$$\lambda = \frac{d}{n} \sin \theta_n = \frac{0.025 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} \sin 0.24 = 5.2 \times 10^{-7} \text{ m}$$

وعندئذ أصبح قادرًا على استنتاج أن الطول الموجى للضوء المرئى يبلغ نحو 500 nm حيث يكون الطول الموجى للضوء الأزرق أقصر نوعًا ما من هذا وللضوء الأحمر أطول قليلاً من هذا .

من الصعب علينا أن نغالى فى أهمية التداخل وخاصة فى حالة الضوء ؛ فموجات التردد الواحد ، تمتلك فى طولها الموجى « أداة ذاتية » لقياس الطول . **فنحن غير قادرين على اكتشاف شكل الموجة عندما نرى الضوء ولكن نمط التداخل هو الذى يكشف عن الطول الموجى .** والأطوال الموجية للضوء المرئى صغيرة جدًا إذا قورنت بدقة أجهزة القياس العادية المستخدمة لقياس الأطوال ، ولذلك يصبح استخدام الضوء كمعيار قياسى ذا فوائد عظيمة . وتسمى الأجهزة التى تستخدم أنماط التداخل لتعيين الأطوال « **أجهزة قياس التداخل** » وبواسطتها أمكن الحصول على أدق القياسات للأطوال .

لقد استخدمنا فى وصف تأثيرات التداخل موجات متشابهة ، تتماثل فى الشكل وفى الطول الموجى . كما أننا اعتبرنا دائمًا أن للموجة علاقات طور محددة مع غيرها من الموجات . ويقال لموجتين من تلك الموجات إنهما متماسكتان أو مترابطتان .

للموجات المترابطة نفس الشكل والطول الموجى كما أن بين بعضهما البعض علاقات طور محددة .

ويطلق على مصادر الموجات المترابطة اسم المصادر المترابطة .

وحيث أن مصدرى الضوء غالبًا ما يكونان غير مترابطين ، فمن الضرورى دائمًا أن نقسم الحزمة الضوئية المنفردة إلى قسمين للحصول إلى نمط للتداخل . ففى تجربة الشق

المزدوج ، مثلاً ، يضاء الشقان بنفس الحزمة الضوئية أو نفس موجة الضوء ، وتقسم هذه الموجة إلى قسمين محددين بواسطة الشقين . وحيث أن الموجتين الناتجتين هما أجزاء من نفس الموجة فإنهما تكونان مترابطتين وتؤديان إلى الآثار التداخلية التى أشرنا إليها آنفاً .

24-4 المسار البصرى المكافئ

ينتقل الضوء فى الفراغ بأقصى سرعة c كما بينا فى القسم 9-23 ، فإذا دخل إلى وسط شفاف معامل انكساره n فإن سرعته تنخفض إلى $v = c/n$. إلا أن تردد الضوء لن يتغير* .
وحيث أن الطول الموجى فى الوسط هو : $\lambda_m = v/f = c/nf$ ؛ بينما هو فى الفراغ $\lambda_{vac} = c/f$ فإن :

$$\lambda_m = \frac{\lambda_{vac}}{n} < \lambda_{vac} \qquad (24\text{-}2)$$

يكون الطول الموجى للضوء المنتشر فى وسط ما أقصر مما إذا انتشر الضوء فى الفراغ .

أى أن الوسط ـ عندما يقوم بإبطاء الضوء المار من خلاله ـ فإنه فى الواقع يضم الموجات إلى بعضها البعض كما هو موضح فى الشكل 7-24 . وعلينا تذكر أن كل طول موجى إنما يمثل دورة طور كاملة للضوء . ويعنى ضم الموجات إلى بعضها أنه لو كان للضوء عدد من الدورات فى طول مقداره L فى الفراغ ، **فإنه سيحتوى على نفس عدد الدورات فى طول أقصر إذا مر من خلال وسط شفاف .**

ويؤدى بنا هذا إلى مفهوم مهم ، سوف نطلق عليه **المسار البصرى المكافئ** للوسط . وسوف نقوم الآن بحساب عدد الأطوال الموجية الواقعة داخل سمك مقداره L لوسط معامل انكساره n وذلك بالنسبة لطول موجى معين للضوء :

عدد الأطوال الموجية فى سمك مقداره L لوسط ما $= \dfrac{L}{\lambda_m} = \dfrac{L}{\lambda_{vac}/n} = \dfrac{nL}{\lambda_{vac}}$

وذلك باستعمال المعادلة (2-24) و أما عدد الأطوال الموجية . داخل مسافة مقدارها L فى الفراغ فهو L/λ_{vac} . وعلى ذلك فإنه بدلالة عدد الأطوال الموجية فى مسافة معينة ومن ثم بدلالة مقدار التغير فى الطور الناتج ، يمكننا استنتاج ما يلى :

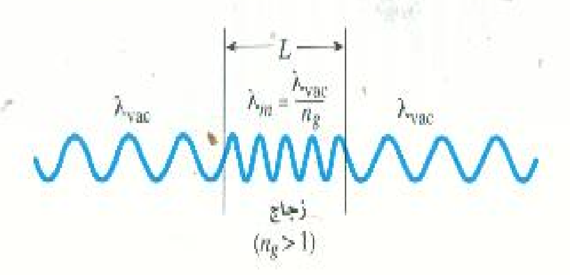
إن مساراً طوله L فى وسط ما ، معامل انكساره n ، يحدث نفس اختلاف الطور فى الضوء ، مثلما يفعل مسار مقداره nL فى الفراغ .

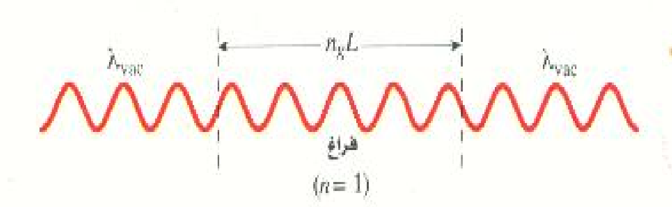
أى أن المكافئ البصرى لمسار مقداره L فى وسط ما معامل انكساره n هو :

$$L_{opt} = nL \qquad (24\text{-}3)$$

* إن كل قمة موجة ترتطم بالحد الفاصل بين الفراغ والوسط تعتبر ، طبقاً لمبدأ هيجنز ، مصدراً جديداً للموجات ، ويبقى تردد الموجات التى تخترق الحد الفاصل دون تغيير أى يظل التردد هو نفس تردد الموجات الساقطة .

وتمدنا معرفتنا بالمعادلة (3-24) بوسيلة ميسورة لإيجاد التغير فى الطور فى موجة ضوئية طولها فى الفراغ هو λ_{vac} ، والناشئ عندما يمر الضوء عبر سمك مقداره L من الوسط : أنه عدد الأطوال الموجية فى الفراغ والتى يحتويها سمك بصرى مكافئ .





شكل 7-24: يحتوى سمك مقداره L من زجاج معامل انكساره n_g نفس عدد الأطوال الموجية التى يحتوى عليها سمك مقداره $n_g L$ فى الفراغ . أى أن للزجاج سمك بصرى مكافئ مقداره $n_g L$.

$$\text{التغير فى الطور (مقدرًا بعدد الدورات)} = \frac{L_{opt}}{\lambda_{vac}} = \frac{nL}{\lambda_{vac}}$$

وهذا الرقم ليس بالضرورة أن يكون صحيحًا بالطبع ، إذا قد يكون كسرًا من دورة أيضًا .

وتتجلى أهمية مفهوم المسار البصرى المكافئ عند مناقشة الكثير من جوانب التداخل كما سنرى فى القسم التالى .

مثال 1-24

ما هى قيم سمك زجاج فلنت والألماس المكافئة لمسافة مقدارها 1.00 cm من الفراغ ؟ وما هو الطول الموجى الذى يتخذه ضوء طوله الموجى $\lambda = 600$ nm إذا مر عبر هاتين المادتين .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن ترجمة السؤال الأول فى إطار الكميات التى تعرّف المسار البصرى المكافئ لوسط ما ؟

الإجابة : يرتبط السمك البصرى المكافئ لمادة ما L_{opt} بالسمك الحقيقى بالعلاقة $L_{opt.} = nL$ (المعادلة 3-24) ومطلوب منك أن تجد السمك الحقيقى للمادة التى تسلك بصريًا مثل 1.00 cm من الفراغ وبعبارة أخرى ، أن تجد قيمة L المناظرة لقيمة $L_{opt} = 1.00$ cm .

سؤال : هل أتوقع أن تكون قيم السمك البصرى أكبر أم أقل من 1.00 cm ؟

الإجابة : المادة التى معامل انكسارها $n > 1$ تقصر الطول الموجى للضوء الذى يخترقها . ولهذا فإن نفس عدد الدورات سيُحتوى داخل سمك **أقصر** من المسافة فى الفراغ .

سؤال : كيف يرتبط الطول الموجى فى وسط ما بمعامل انكسار ذلك الوسط ؟

الإجابة : فى داخل وسط ما ، يكون $\lambda_m = \lambda_{vac}/n$ ، حيث λ_{vac} هو الطول الموجى فى الفراغ .

الحل والمناقشة : بالنسبة للسمك البصرى L_{opt} الذى مقداره 1.00 cm فإن القيم الحقيقية للسمك L هى :

$$L\ (\text{زجاج}) = \frac{L_{opt}}{n} = \frac{1.00}{1.52} = 6.58\ \text{mm}$$

$$L\ (\text{ألماس}) = \frac{1.00\ \text{cm}}{2.42} = 4.13\ \text{mm}$$

ويحتوى 1.00 cm من الفراغ على :

$$\frac{1.00\times10^{-2}\ \text{m}}{6.00\times10^{-9}\ \text{m}} = 1.67\times10^{4}$$

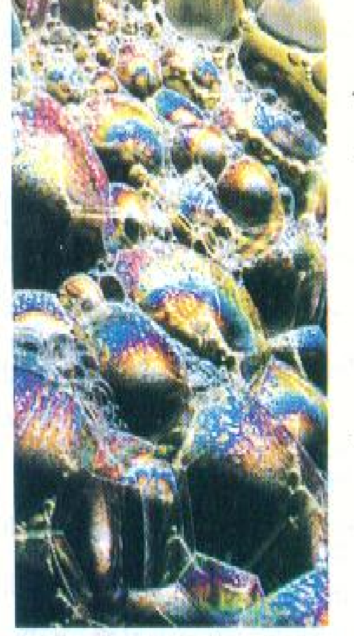
أى 1.67×10^{4} طولاً موجيًا أو دورة . ولكى يكون السمك الحقيقى مكافئًا بصريًا فإنه يحتوى على نفس العدد من الأطوال الموجية . وفى الحالة الراهنة فإن 6.58 mm من الزجاج مكافئة بصريًا لسمك مقداره 4.13 mm من الألماس ، ويحتوى كل من السمكين على 1.76×10^{4} طولاً موجيًا .

ويتحدد الطول الموجى فى كل من الوسطين بالعلاقة 2-24 :

$$\lambda_m\ (\text{زجاج}) = \frac{600\ \text{nm}}{1.52} = 395\ \text{nm}$$

$$\lambda_m\ (\text{ألماس}) = \frac{600\ \text{nm}}{2.42} = 4.13\ \text{nm}$$

24-5 التداخل فى الأغشية الرقيقة



توضح فقاعات الصابون ظاهرة التداخل فى الأغشية الرقيقة . وتعتمد الأطوال الموجية لموجات الضوء التى نراها متداخلة بشكل بناء ، وهى ترتد من السطحين العلوى والسفلى للفقاعة ، على الزاوية التى ننظر بها إلى الفقاعة . ولهذا فإننا نشاهد ألوانًا متباينة نتيجة لظاهرة التداخل عندما ننظر إلى مناطق مختلفة من الفقاعة .

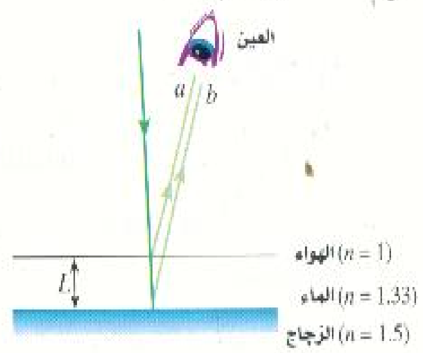
إن الهدبات الملونة التى كثيرًا ما نراها فى أغشية الزيت أو الصابون ، من أكثر مظاهر التداخل شيوعًا وانتشارًا ، وسنقوم الآن بتحليل هذا النوع المهم من التداخل .

يبين الشكل 8-24 غشاءً رقيقًا من الماء سمكه L فوق شريحة زجاجية والضوء الذى نراه منعكسًا من الغشاء قد انعكس جزء منه من السطح العلوى للماء وجزء آخر من السطح الفاصل بين الزجاج والماء . ويمثل الشعاعان a و b هذين الانعكاسين . ولكى نبسط المناقشة فقد جعلنا الشعاعين يكادان أن يكونا متعامدين على الغشاء حتى لا نضطر إلى معالجة انكسار الأشعة .

والشعاعان a و b مترابطان لأنهما جزء من نفس الحزمة الساقطة ، ومن ثم فهما متفقان فى الطور عندما يلتقيان بالسطح العلوى للغشاء المائى . ويتباطأ الشعاع b عندما يمر عبر الغشاء ، بالنسبة للشعاع a ، لأن عليه أن يخترق سمك الغشاء مرتين (فى رحلة طولها $2L$) قبل أن يغادر الماء ويلتقى بالشعاع a ليتحد معه . أى أن اختلافًا فى الطور بين الشعاعين قد نشأ ، يعتمد على **طول المسار البصرى المكافئ** الذى يقطعه الشعاع b . وهذا الاختلاف فى الطور ـ طبقًا لما قدمناه فى القسم السابق ـ هو :

$$\text{الفرق فى الطور بين الشعاعين } a \text{ و } b = \frac{L_{opt}}{\lambda_{air}} = \frac{2nL}{\lambda_{air}}$$

فإذا كان هذا الفرق مساويًا لعدد صحيح ، فإن الشعاع b سيتحد **فى نفس الطور** مع الشعاع a عندما يعود الشعاع b ويخترق السطح العلوى للغشاء ولهذا فإن الضوء المنعكس من سطحي الغشاء سيكون **ساطعًا** ، أما إذا كان المقدار $2L_{opt}$ عددًا فرديًا من **أنصاف** الأطوال الموجية ($\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ ، $5\lambda/2$ . . إلخ) فإن التحام الشعاعين سيكون مختلفًا فى الطور بنصف دورة مما ينتج عنه تداخل هدام .



شكل 24-8:
تنتقل الأشعة الضوئية المنعكسة من السطحين العلوى والسفلى لغشاء رقيق لمسافات مختلفة قبل أن تلتحم معًا ، وترى العين ظاهرة التداخل الناتجة .

وسمك الأغشية الرقيقة عادة ما يكون مقاربًا أو أقل من الأطوال الموجية للضوء المرئى ولذلك ، إذا أضيء الغشاء بضوء أبيض ، فإن التداخل البناء قد يحدث لأحد الأطوال الموجية فقط دون باقى الأطوال الموجية الصادرة عن المصدر . ويرى الغشاء بواسطة الضوء المنعكس ملونًا نتيجة لذلك .

هناك أيضًا مصدر آخر لحدوث اختلاف أو فرق فى الطور عند تناول الانعكاسات ولعلك تذكر من مناقشاتنا للموجات المتكونة فى الأوتار ؛ أننا لاحظنا انقلاب الموجة (أى تغيرًا فى الطور مقداره 180° أو نصف دورة) عندما تنعكس عند الطرف المثبت للوتر . أما الموجة المنعكسة من طرف حر للوتر فلا تعانى من أى تغير فى الطور . وتحدث ظاهرة مماثلة عندما ينعكس الضوء على الحد الفاصل بين مادتين لهما معاملا انكسار مختلفان .

إذا انعكس ضوء ينتقل فى وسط معامل انكساره n_1 على وسط آخر معامل انكساره أكبر $(n_2 > n_1)$ فإن الموجة المنعكسة ستختلف فى الطور بنصف دورة بالنسبة للموجة الساقطة .

أما إذا كان $n_1 > n_2$ فإن الموجة المنعكسة لن تعانى أى اختلاف فى الطور .

وهذا الاختلاف فى الطور سيكون بالإضافة إلى اختلاف الطور الناشئ عن المسارات البصرية غير المتساوية .

وتعتمد كيفية تداخل الأشعة عندما تتحد على **الفرق الكلى** فى الطور . فإذا كانت الأشعة تعانى من فرق فى الطور مقداره 180° أو صفر عند الانعكاس فإن العامل الوحيد الذى يحدد التغير الكلى فى الطور هو الفرق فى طول المسار البصرى المكافئ ، كما سبق وناقشنا . إلا أنه إذا عانى أحد الشعاعين أو غيره من تغير فى الطور نتيجة الانعكاس بينما لا يعانى الشعاع الآخر ، فإن هذا التغير لابد من إضافته إلى الفرق الناتج من اختلاف طول المسار .

وتلخيصًا لما سبق نقول أنه لحساب شروط التداخل بالنسبة للضوء المنعكس من غشاء رقيق فإن الواجب :

1 أن نحدد معاملات انكسار المادة التي يسقط منها الضوء والغشاء والمادة التي يستقر الغشاء فوقها . وأن نستخدم هذه المعلومات لتحديد ما إذا كان هناك تغير في الطور نتيجة للانعكاس .

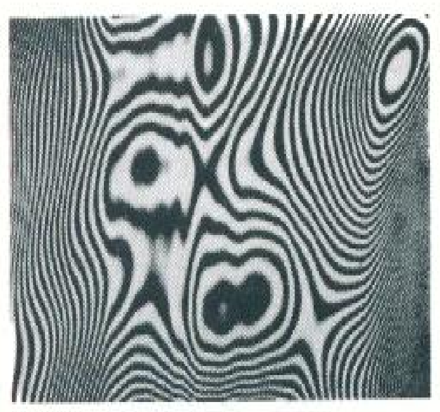
2 إذا لم يكن هناك تغير في طور أي من الشعاعين أو في كليهما عند الانعكاس فإن انعكاسًا ساطعًا سيحدث عندما يكون المسار البصري لرحلة الضوء عبر الغشاء (جيئة وذهابًا) مساويًا لعدد صحيح من الأطوال الموجية .

3 إذا عاني أي من الشعاعين من تغير انعكاسي في الطور لنتج انعكاس ساطع عندما يكون المسار البصري لرحلة الشعاع عبر الغشاء (جيئة وذهابًا) مساويًا لعدد فردى من أنصاف الأطوال الموجية .

ويعتبر غشاء الماء الذي يحيط به الهواء من فوقه ومن أسفل منه ، مثالاً على الحالة الأخيرة (رقم 3) . حيث يحدث تغير في الطور مقداره نصف دورة عند الانعكاس بالنسبة للشعاع a ، في حين لا يحدث أي فرق في الطور بالنسبة للشعاع b .

ويلاحظ أن شرط حدوث تداخل بنَّاء يتحول إلى تداخل هدَّام عندما يتغير سمك الغشاء L بمقدار $\lambda/4$. وعلى الرغم من أن هذا التغير في السمك طفيف جدًا . إلا إن ملاحظته ميسورة جدًا وعلى هذا يصبح للتداخل الكثير من التطبيقات المبينة على أساس قدرته على اكتشاف أي تغير طفيف للغاية في الأبعاد .

كما يعتبر اختبار استواء السطوح من التطبيقات المهمة وذلك باستخدام مقاييس عيارية تعرف **بالأسطح بصرية الاستواء** . وهي تصنع من ألواح زجاجية ذات سطحين متوازيين تمامًا بدقة تصل إلى كسر من طول موجي للضوء المرئي . ويتم الاختبار بوضع سطح بصرى الاستواء فوق عينة المادة المراد التأكد من أنها مستوية تماما . ثم يسلط ضوء أحادي اللون على السطح بصرى الاستواء ، فإذا كانت العينة ذات سطح غير مستو تمامًا ، فإن غشاء رقيقًا من الهواء سيحتجز بين السطح بصرى الاستواء والعينة . ويظهر التباين في سمك هذا الغشاء الرقيق نتيجة عدم استواء سطح العينة على هيئة هدبات تداخل ساطعة ومظلمة كما يوضحها الشكل 9-24 .



شكل 9-24:
منظر للهدبات المشاهدة نتيجة وجود غشاء هوائي على هيئة أسفين بين شريحتين زجاجيتين ليستا مستويتين . وتنتمي كل هدبة مظلمة إلى منطقة يتساوى فيها سمك الغشاء ؛ والتغير في السمك بين هدبتين متجاورتين هو $\lambda/2n$. وتشير الهدبات إلى أن الشريحتين مستويتان تقريبًا بالقرب من الطرف الأيسر فقط .

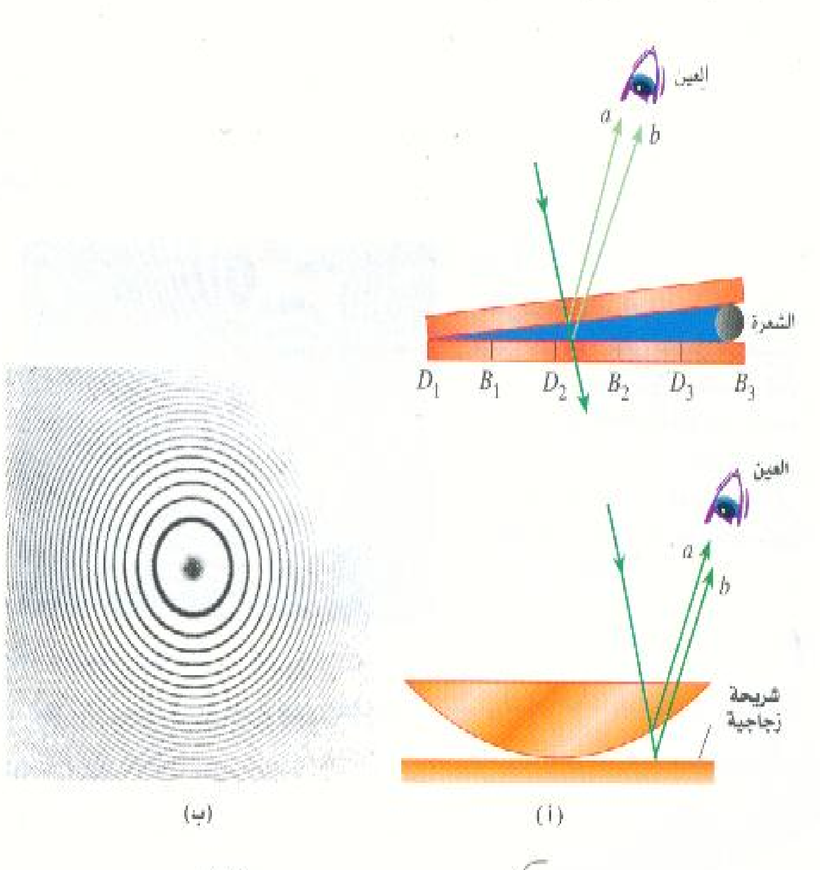
وعندما تختفي كل الهدبات ، فإن معنى ذلك أن العينة صقلت إلى درجة من الاستواء تماثل استواء السطح العيارى إلى درجة من الدقة تصل إلى ما يقرب من $\lambda/4$ للضوء المستخدم .

ويعتبر استخدام الأسطح بصرية الاستواء في قياس أشياء رقيقة للغاية مثالاً آخر على ظاهرة تداخل الأغشية الرقيقة وتطبيقاتها . افترض أننا وضعنا شعرة بين طرفي شريحتين

زجاجيتين مستويتين بصريًا كما هو مبين بالشكل 10-24 ، بحيث تتكون طبقة من الهواء على هيئة إسفين بين السطحين المستويين . وعندما يسلط ضوء أحادى اللون من أعلى هذا الأسفين فإننا سنلاحظ سلسلة من هدبات التداخل الساطعة والمظلمة بالتبادل عبر الشريحتين ، وموازية للشعرة كما هو مبين في الشكل 10-24 . وتكون الهدبة الواقعة عند الحافة حيث تتلامس الشريحتان معتمة (D_1 في الشكل 10-24) لأن اختلاف الطور الوحيد هنا هو الناشئ عن انعكاس الشعاع b من الشريحة السفلى ويمثل التباعد بين مركزى هدبتين مظلمتين متجاورتين زيادة مقدارها $\lambda/2$ في سمك الأسفين الهوائى . (عليك أن تفسر صحة هذا الأمر) . أما إذا كان هناك ثلاث هدبات مظلمة من الطرف الذى تتلامس عنده الشريحتان حتى الطرف حيث تفصلهما الشعرة ، فإن تباعد الشريحتين الناشئ عن وجود الشعرة سيكون $3\lambda/2$. فإذا كان نمط التداخل هذا قد نتج عن ضوء طوله الموجي 600 nm ، مثلاً ، فلابد أن نستنتج أن سمك الشعرة 900 nm أو $0.900\ \mu m$.

أجريت التجربة المبينة في الشكل 11-24 على يدى نيوتن وهى الأخرى تصور التداخل في الأغشية الرقيقة . وتبدأ هذه التجربة بوضع عدسة مستوية - محدبة (انحناؤها أقل بكثير عما هو مبين بالرسم) على شريحة زجاجية مستوية ويسلط عليها ضوء أحادى اللون من أعلى . وتؤدى الأشعة المنعكسة نحو العين من سطحى الإسفين الهوائى المتكون بين العدسة والشريحة إلى تكون نمط للهدبات كالمبين في الشكل 11-24 وهو ما اصطلح على تسميته **بحلقات نيوتن** . ويعزى تكون هذا النمط إلى نفس السبب المذكور في الحالة المبينة في الشكل 10-24 . فيما عدا أن الهدبات مستديرة بسبب الهندسة الدائرية للإسفين الهوائى الذى تكونه العدسة .

شكل 10-24:
يفصل بين طرفى الشريحتين إلى اليمين شعرة . والشريحتان مستويتان بصريًا . أما الشعرة فإنها تكون فجوة هوائية على هيئة إسفين بين الشريحتين . وتتسبب هذه الفجوة في خلق نمط تداخل عند تسليط ضوء أحادى اللون على الشريحتين من أعلى (وقد بينا شعاعًا ساقطًا واحدًا وآخر منعكسًا من أجل الإيضاح ، ولكنك تدرك - بالطبع - أن الضوء يسقط وينعكس عبر الشريحتين بأكملهما) .



شكل 11-24:
(أ) يتداخل الشعاع a ، المنعكس من السطح السفلى للعدسة مع الشعاع b المنعكس من الشريحة الزجاجية .
(ب) يسمى نمط التداخل الناتج عن هذا التداخل بحلقات نيوتن . لماذا كان مركز النمط مظلمًا ؟ (لقد تم تغيير الزوايا في الشكل (أ) حتى يمكن توضيح الشعاعين المنعكسين) .

مثال 2-24 :

تغطى العدسات أحيانًا بطبقة رقيقة من فلوريد المغنسيوم ($n = 1.38$) للإقلال من الانعكاس وبذلك تقوى شدة الضوء النافذة . ما هو سمك أرق طبقة يمكنها أن تحدث الحد الأدنى من الانعكاس لضوء طوله الموجى 550 nm ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يعنى « الحد الأدنى من الانعكاس » بالنسبة للمصطلحات التى تناولناها عند مناقشة الأغشية الرقيقة ؟

الإجابة : إنه سمك الغشاء الذى يتسبب فى تداخل هدّام بين الأشعة المنعكسة من سطحى الغشاء .

سؤال : ما هى الأشعة التى ستعانى من اختلاف فى الطور عند الانعكاس ؟

الإجابة : يمكنك ـ من الجدول 2-23 ـ أن تعرف أن $n_{glass} > n_{MgF_2}$. ولذلك فإن الانعكاس من على سطحى MgF_2 سينتج اختلافًا فى الطور مقدار نصف دورة .

سؤال : ما هو الشرط المطلوب فى طول المسار اللازم لإحداث تداخل هدّام ؟

الإجابة : إن الاختلاف الكلى فى الطور ناشئ بأكمله عن الاختلاف فى طول المسار البصرى .

سؤال : ما هو الشرط الذى يحقق أرق طبقة ؟

الإجابة : ستؤدى قيم السمك المختلفة إلى تداخل هدّام ، بينما ينتمى **الحد الأدنى** للسُمك للعلاقة $2nL = \lambda/2$.

الحل والمناقشة : إذا عبرنا عن الحل بالأرقام فإن :

$$2\,(1.38)L = \frac{(550\text{ nm})}{2}$$

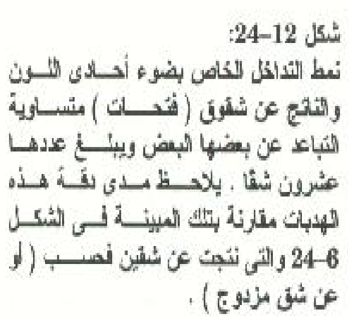
$$L = 99.6\text{ nm}$$

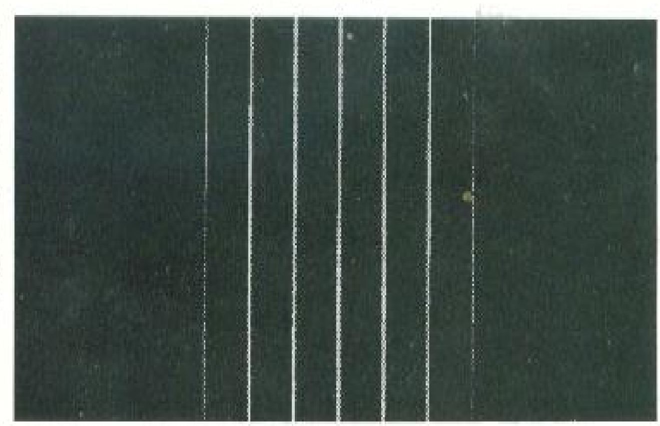
ويشار إلى طبقة الطلاء المضاد للانعكاس باسم طبقة **ربع الموجة** ، ويلاحظ أن شرط الحد الأدنى من سمك الطبقة هو نفسه $nL = \lambda/4$. ومن ثم يكون **السمك البصرى** للغشاء مساويًا $\lambda/4$.

6-24 محزوز الحيود

على الرغم من أن العالم يونج قد قام بتجربة الشق المزدوج لقياس الطول الموجى للضوء ، إلا أن النمط الذى حصل عليه للشق المزدوج كان على درجة من التشوش بحيث لم يعط نتائج دقيقة ، واتضح أن عددًا كبيرًا من الشقوق ذات الأبعاد المتساوية عن بعضها البعض ، تعطى نظامًا أكثر حدة وإتقانًا للهدبات . ويبين الشكل 12-24 ، مثلاً ، نمط التداخل المناظر لعشرين شقًا متوازيًا يسقط عليها ضوء أحادى اللون حيث يلاحظ مدى حدة الهدبات ويستخدم عدد كبير من الشقوق المتوازية ذات المسافات البينية المتساوية ،

لقياس الأطوال الموجية بدقة كبيرة . والنبيطة التى يتوفر لها هذا العدد تسمى **محزوز الحدود** وقد يحتوى محزوز نموذجى على 10,000 شقا متوازيًا ، يبعد كل منها عن الشق المجاور لها بمسافة $d = 10^{-4}$ cm . وسنقوم الآن بدارسة سلوك هذا المحزوز .





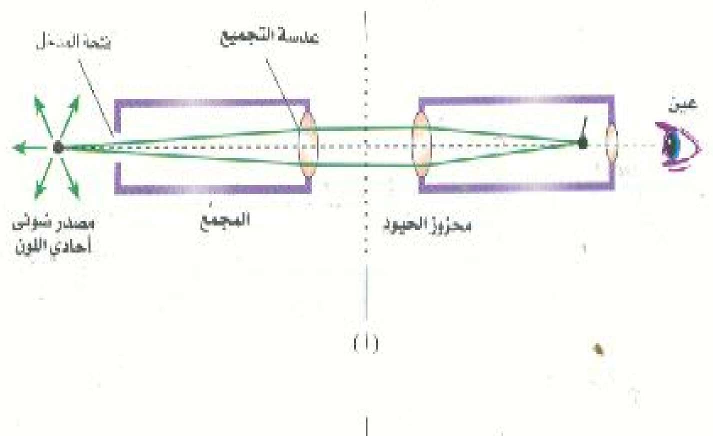
شكل 12-24:
نمط التداخل الخاص بضوء أحادى اللون والناتج عن شقوق (فتحات) متساوية التباعد عن بعضها البعض ويبلغ عددها عشرون شقا . يلاحظ مدى دقة هذه الهدبات مقارنة بتلك المبينة فى الشكل 6-24 والتى نتجت عن شقين فحسب (أو عن شق مزدوج) .

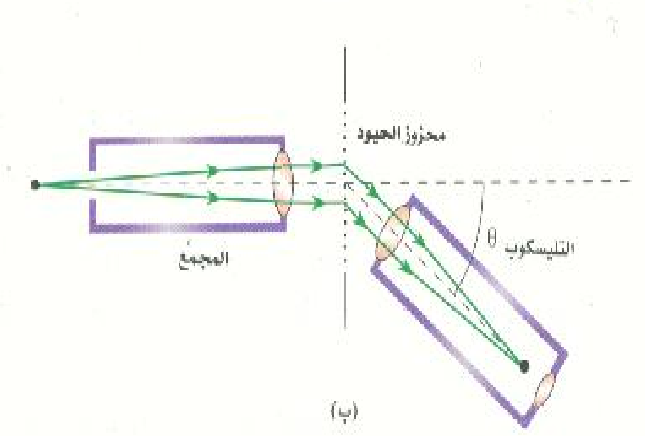
ويتم استخدام محزوز الحيود عادة بالأسلوب المبين فى الشكل 13-24 (أ) . دعنا نفترض الآن أننا نستعمل ضوءًا من مصدر أحادى اللون لإضاءة شق المدخل ، وحيث أن هذا الشق يقع عند بؤرة **عدسة التجميع*** فإن حزمة من الضوء المتوازى تخرج من هذه العدسة لكى تسقط متعامدة على المحزوز . وتقع شقوق المحزوز بحيث تتعامد على الصفحة كما فى الشكل 13-24 (أ) . ويمكننا مشاهدة الضوء النافذ من المحزوز بواسطة تلسيكوب صغير . وبغض النظر عن الطول الموجى المستخدم فى إضاءة المحزوز فإننا سنشاهد صورة حادة للشق عندما ننظر مباشرة إلى الشعاع .

افترض الآن أننا نحرك التليسكوب فى مستوى أفقى بزاوية θ مع الاتجاه المباشر ، كما هو مبين فى الشكل 13-24 (ب) . لن نرى أى ضوء على الإطلاق عند معظم قيم θ ، إلا إنه عند قيم محددة فإننا سنرى صورة حادة لفتحة المدخل . . وهذه الصور مكافئة للهدبات الساطعة المبينة فى الشكل 12-24 وأن كانت أكثر تحديدًا .

وإذا غيرنا الطول الموجى المستخدم فى الإضاءة فإننا نغير من ثم قيم θ التى تظهر عندها الضوء ، فإذا كانت الإضاءة تحتوى على أكثر من طول موجى منفرد فإن كل طول موجى سوف ينتج صورة لفتحة المدخل عند زاوية منفصلة عن تلك الناتجة بواسطة أطوال موجية أخرى . فالضوء الصادر من المصدر سيتم فصله إلى عدد من الصور الحادة والتى تنتمى كل منها لطول موجى منفرد من الأطوال الموجية الموجودة فى الضوء المسلط على المحزوز . وهذه الصور هى التى تسمى **خطوط الطيف** ، وهى المميزة للطيف المنبعث من المصدر . وبسبب هذه الإمكانية ، فإن الجهاز الذى يشبه ما يوضحه الرسم فى الشكل 13-24 يسمى **مطياف المحزوز** . سنقوم الآن بدارسة العلاقة بين الطول الموجى المستخدم فى إضاءة المحزوز والزوايا التى ترصد عندها صورة فتحة المدخل .

* **عدسة التجميع** هى عدسة لامة أو مجمِّعة تستخدم لإنتاج أشعة متوازية أو **مجمعة** . ويتم هذا بوضع العدسة على مسافة بعد بؤرى من مصدر ضوئى صغير . وكما درسنا فى الفصل الثالث والعشرين فإن الأشعة الساقطة التى تخرج من المصدر متفرقة ستمر من العدسة وهى موازية للمحور الرئيسى .



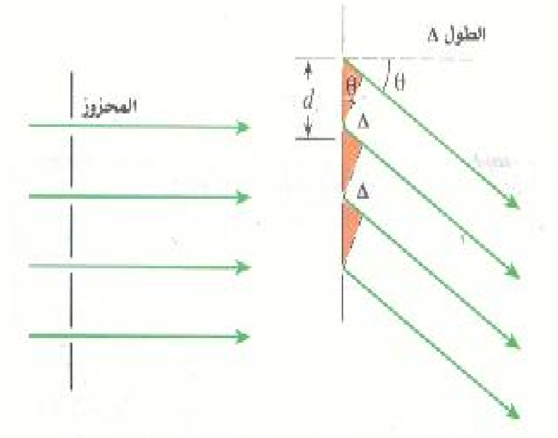


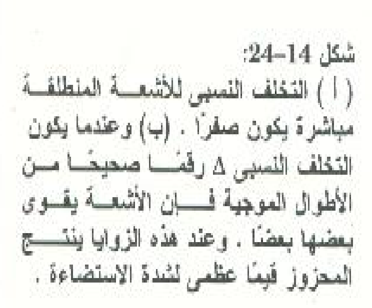
شكل 13-24:
(أ) رسم تخطيطي لمطياف المحزوز وهو واحد من أكثر التطبيقات شيوعا بالنسبة لمحزوز الحيود . (ب) وعندما يدار التليسكوب في قوس دائرة مركزها محزوز الحيود ، فإن صورة الفتحة تتكون نتيجة تداخل بناء عندما يصنع التليسكوب زاوية مقدارها θ مع الحزمة غير المنحرفة . وتعتمد هذه الزاوية على الطول الموجي الساقط على المحزوز .

إن أول ما تجب معرفته هو أن كل شق (فتحة) ضيق في المحزوز سيعمل عمل مصدر للموجات الضوئية (مبدأ هيجنز) . عندما تكون $\theta = 0$ في الشكل 13-24 (ب) فسنرى الحزمة غير المنحرفة والمبينة في الشكل 14-24 (أ) . فإذا انتقلت الأشعة الصادرة من جميع الفتحات لنفس المسافة نحو التليسكوب فإنها تقوى بعضها البعض . ويكون هذا صحيحًا بالنسبة لأي طول موجي . وعلى ذلك ، يكون توجيه التليسكوب بحيث $\theta = 0$ يجعلنا نرى صورة فتحة المدخل التي تحتوي على جميع الأطوال الموجية في المصدر الضوئي . وتسمى هذه الصورة بأسماء مختلفة مثل : **القيمة العظمى المركزية** ، **القيمة العظمى ذات الرتبة الصفرية** ، **والصورة المركزية** .

افترض أنه عند زاوية معنية θ ، كالمبينة في الشكل 14-24 (ب) ، رأينا صورة مضيئة لفتحة المدخل ، وأشعة الضوء القادمة من كل فتحات المحزوز ، ستكون مرة أخرى متوازية مع بعضها البعض عند دخولها إلى التليسكوب ، ولكنها الآن لم تعد **موجهة** في الاتجاه غير المنحرف . ويتخلف كل شعاع عن الذي يجاوره أو يسبقه كما هو مبين ، بمسافة مقدارها Δ . ونعلم مما سبق أن قيم $\Delta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ .. إلخ تجعل الأشعة يقوى بعضها بعضًا . وعلى هذا يكون الشرط اللازم حتى يمكن رؤية الصورة هو $\Delta = m\lambda$ ، حيث m هو رقم صحيح .

إذا اعتبرنا أي مثلث ملون في الشكل 14-24 (ب) فسنجد أن $\sin\theta = \Delta/d$ حيث d هو المسافة بين فتحات المحزوز وتسمى **تباعد المحزوز** ولكي تتكون الصورة لابد أن يكون لدينا $\Delta = m\lambda$ ، أي أننا سنجد صورًا مضيئة لفتحة المدخل عندما تكون θ مساوية لقيم θ_m التي تعطى بالمعادلة :




شكل 14-24:
(أ) التخلف النسبي للأشعة المنطلقة مباشرة يكون صفرًا . (ب) وعندما يكون التخلف النسبي Δ رقمًا صحيحًا من الأطوال الموجية فإن الأشعة يقوي بعضها بعضًا . وعند هذه الزوايا ينتج المحزوز قيمًا عظمى لشدة الاستضاءة .

$$m\lambda = d \sin \theta_m \ , \ \ m = 1, 2, 3, \ldots\ldots \qquad (24\text{–}4)$$

وهى معادلة المحزوز .

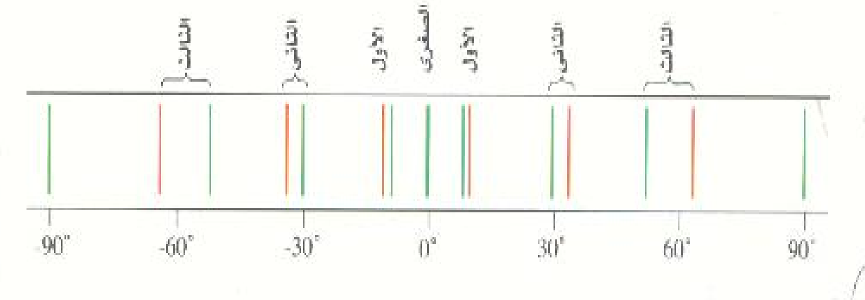
وسنفترض ـ من أجل استيعاب أفضل معادلة المحزوز ـ أن مصدر الضوء يحتوى على طولين موجبين فحسب وهما 500 nm و 600 nm . وسنفترض أيضًا أن $d = 2 \times 10^{-6}$ m فإذا عوضنا بهذه الأرقام فى المعادلة 4-24 لوجدنا مواقع الصور المدونة فى الجدول 1-24 وهذه الصور مبينة أيضًا فى الشكل 15-24 مقترنة مع الأسماء التى تطلق عليها . (وحيث أن خطوط الطيف من الرتبة الرابعة تحدث عند $\theta = 90°$ أو أكبر من هذا فإنها لا يمكن أن ترى) . يلاحظ أن الخطوط تظهر على جانبى القيمة العظمى المركزية ، كما يلاحظ أن التباعد بين كل خطين يتزايد مع ازدياد قيمة θ ، ومن الوسائل المتبعة لجعل مواقع صور الرتبة الأولى تحدث عند زوايا أكبر ، هى أن نجعل d أصغر ما يمكن . كما تشير بذلك المعادلة 4-24 . فإذا فعلنا ذلك لأمكننا فصل الخطوط المتكدسة إلى بعضها البعض .

جدول 1-24:
مواقع خطوط الطيف*

λ(nm)	m	درجة θ_m
600 و 500	0	0
500	1	14.5
600	1	17.5
500	2	30.0
600	2	36.9
500	3	48.6
600	3	64.2
500	4	90
600	4	مفقود

* افترض $d = 2\mu$m

وحيث أننا نستطيع قياس الزاوية θ_m بدقة كبيرة ـ وهى الزاوية تحدث عندها القيمة العظمى من الرتبة m ـ فإنه يصبح من الضرورة معرفة تباعد المحزوز d فحسب حتى نتمكن من تعيين λ بدقة . فإذا استخدم الضوء الأصفر المنبعث من مصباح قوس الصوديوم ، مثلاً ، ولو مع مطياف بسيط ، فلم يكون من الصعب مشاهدة صورة **فتحتين** (أو خطين) للضوء الأصفر عند موضع كل رتبة ويكون هذان الخطان متقاربين جدًا وطولاهما الموجيين هما 589.0 nm و 589.6 nm . إن الحقيقة المحضة وهى أننا قادرون على رؤية هذين الخطين على هيئة صورتين محددتين إنما توفر لنا مقياسًا لدى دقة مثل هذا الجهاز .



شكل 15-24:
يحتوى كل من الرتب الأولى والثانية والثالثة على خطين أحدهما للضوء 500 nm والثانى للضوء 600 nm .

مثال 3-24 :

محزوز حيود به 1.0000×10^4 خط في كل سنتيمتر ، فعند أية زوايا يظهر خط الصوديوم الذى طوله الموجي 589.0 nm ؟ ما هي الدقة المطلوبة حتى يمكنك قياس الزوايا التى تتيح رؤية التباعد بين هذا الخط وخط الصوديوم الآخر 589.6 nm ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي معادلة الزاوية المناظرة لصورة من الرتبة الأولى ؟

الإجابة : $\sin\theta_1 = \frac{\lambda}{d} = \frac{0.5890 \times 10^{-6}\ m}{d}$

سؤال : ما هو تباعد المحزوز d ؟

الإجابة : $d = \frac{1}{1.0000 \times 10^4\ lines/cm} = 1.0000 \times 10^{-6}\ m$

سؤال : ما الذى يحدد إمكانية ظهور خط من الرتبة الثانية من عدمه ؟

الإجابة : إن المقدار $\sin\theta_m$ لابد أن يظل دائمًا أقل من الواحد ، ولهذا فالشرط اللازم لظهور خط من الرتبة m هو $m\lambda/d < 1$.

سؤال : ما هي الزاوية التى سيظهر عندها الخط 589.6 nm ؟

الإجابة : سيظهر عند زاوية تحقق المعادلة $\sin\theta_1 = \frac{(0.5896 \times 10^{-6}\ m)}{d}$

الحل والمناقشة : تحدث الخطوط من الرتبة الأول عند الزاويتين $\sin^{-1} 0.5980$ و $\sin^{-1} 0.5986$. وهاتان الزاويتان هما :

$$\theta_1 = 36.09^\circ \quad \text{و} \quad 36.13^\circ$$

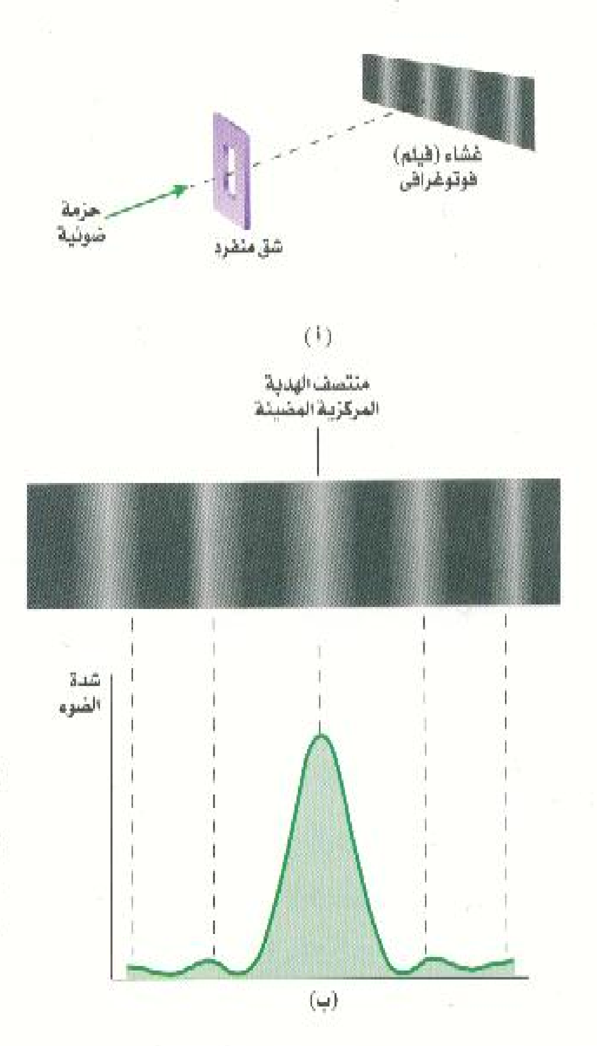
ولكى تتمكن من فصل هذين الخطين ستكون فى حاجة لقياس زوايا إلى أقرب 0.01° .

أما خطوط الرتبة الثانية فتستلزم أن تكون $\sin\theta_2 = \sin\theta_1$. (لاحظ أن هذا لا يعنى أن الزوايا تتضاعف !) . وفى كلتا الحالتين سيكون هذا الرقم أكبر من الواحد الصحيح ومن ثم لن تظهر خطوط الرتبة الثانية .

7-24 الحيود بواسطة شق منفرد (فتحة منفردة)

لقد اعتبرنا ـ حتى الآن ـ أن عرض الشق مهمل إذا قورن بالطول الموجي للضوء المستخدم فإذا نظرت إلى الشكل 1-24 ، لرأيت أن الحيود بالنسبة للأطوال الموجية الأطول يكون أكبر من نظيره للأطوال الموجية الأقصر . ويعني هذا أن الحيود يعتمد على حجم الطول الموجي بالنسبة لعرض الفتحة . ونود الآن أن ندرس أسباب هذه الظاهرة وأن نصف بطريقة أكثر شمولاً كيف يقوم الشق المنفرد بإحداث حيود للضوء . وسوف تشكل النتيجة التى نحصل عليها أهمية أساسية ، كما أنها سوف تضع قيودًا على مقدرتنا على القيام بقياسات .

ولكى نشاهد ظاهرة حيود الموجات الضوئية فإننا نستطيع إرسال الضوء عبر شق منفرد ثم نسجل الضوء النافذ على غشاء فوتوغرافى ، كما هو موضح فى الشكل 16-24 . والهدبة المركزية المضيئة أعرض بكثير من الشق نفسه . وعلاوة على ذلك ، فإن الهدبات المضيئة التى تفصل بينها هدبات مظلمة تظهر على جانبى الصورة المركزية (الوسطى) . ولابد أن تنتج هذه الهدبات المضيئة من التداخل وسنقوم الآن بفحص ما ينطوى عليه هذا الموقف .

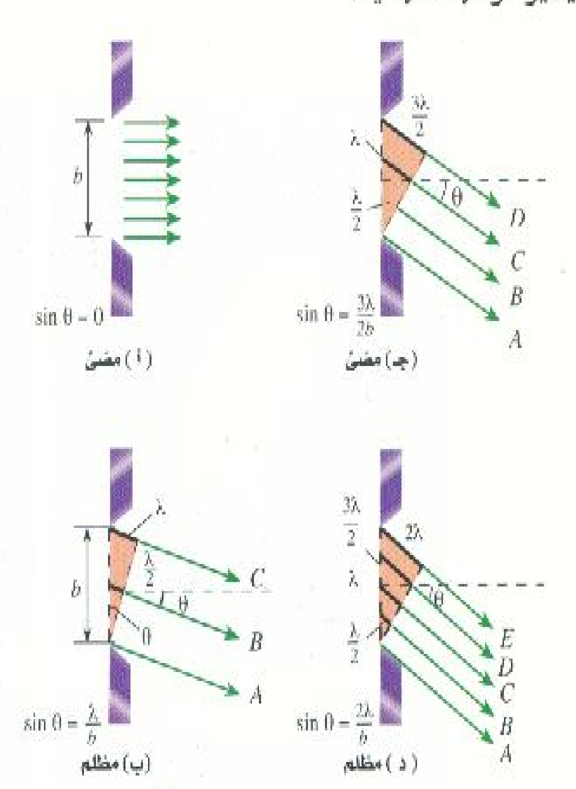


شكل 16-24:
(أ) نمط تداخل من شق منفرد (الأبعاد ليست واقعية) . (ب) المنطقة المضيئة الوسطى أكثر شدة من الهدبات عند الرتب الأعلى كما يوضح الرسم البيانى .

اعتبر قمة موجية ترتطم بالفتحة . . إن كل نقطة ضئيلة من نقط تلك القمة ستعمل - حسب مبدأ هيجنز - عمل مصدر لموجات جديدة . وهكذا تنبعث أشعة ضوئية من كل النقط على امتداد القمة ، فتنتشر بعض الأشعة إلى الأمام مباشرة بينما تميل الأخرى بزاوية مقدارها θ على الاتجاه الأمامى . وتكون الأشعة الضوئية التى تنتقل مباشرة عبر الفتحة - كما يبين ذلك الشكل 17-24 (أ) - متفقة كلها فى الطور مع بعضها البعض . وهذا هو ما يجعل موضع الاختراق المباشر أكثر سطوعًا ويؤدى إلى ظهور الهدبة المركزية المضيئة فى الشكل 16-24 . إلا إنه عند وجود زاوية مقدارها θ مع الحزمة التى تنفذ مباشرة للأمام ، فإن الأشعة المنبعثة من أجزاء مختلفة للفتحة سوف تنتقل مسافات مختلف إلى أن تصل إلى الغشاء (الفيلم) . ويوضح الشكل 17-24 (ب) ؛ (جـ) ؛ (د)

أكثر تلك المواقف أهمية* .

إن الشعاع B المنطلق من منتصف الفتحة ؛ يتخلف على الشعاع A بمقدار نصف طول موجي (الجزء ب من الشكل ، ويؤدى ذلك إلى أن يلغى الشعاعان أحدهما الآخر . على أن هذا ليس كل شيء . لأننا سنرى أن الأشعة التي ستغادر الفتحة من مواقع فوق كل من A و B ، هي الأخرى يلغي بعضها بعضًا وذلك لأن فرق المسار فيما بينها هو $\lambda/2$. والواقع أن كل شعاع ينطلق من النصف السفلي للفتحة ، سيناظره شعاع ينطلق من النصف العلوي ليلغي كل منهما الآخر . وعلى ذلك ، فعند هذه الزاوية θ ، لن يصل ضوء إلى الغشاء من الفتحة ونشاهد هدبة مظلمة . وكما هو واضح من الشكل فإن هذا الموقف يتحقق عندما $\sin\theta = \lambda/b$ حيث b هو عرض الشق . ويلاحظ أنه لو كان b يساوي الطول الموجي للضوء ، فإن الهدبة المظلمة سوف تظهر عند $\theta = 90°$. وبعبارة أخرى ، **لو أخذ عرض الفتحة في التناقص حتى صار مساويًا λ فإن صورة الفتحة ستأخذ في الانتشار حتى يصير عرضها لانهائيا .**



شكل 17-24:
عند تحليل الشق المنفرد نوعيًا فإننا نقسم الفتحة أو الشق إلى أجزاء تختلف الأشعة المنبعثة منها فيما بينها بمقدار $\lambda/2$ في طول المسار . لماذا ؟

ولو أن b كان أكبر بكثير من λ ، كما في الشكل 17-24 فإن هدبة مضيئة جانبية ستظهر عند الزاوية θ المبينة في الجزء (جـ) . وفي هذه الحالة فإن الأشعة القادمة من الثلث السفلي للشق سيقوم بإلغاء الأشعة القادمة من الثلث الأوسط ، في حين يبقى للثلث العلوي بدون إلغاء . ويتحقق الظلام مرة أخرى عند زوايا أكبر كالموضحة في الجزء (د) ، حيث يمكن اعتبار أن الشق قد انقسم إلى أربعة أرباع . فالربع السفلي

* لو كانت كل الأشعة متوازية لما أمكن أن تتلاقى ، ونتيجة لذلك لما حدث تداخل بينها وأمامنا هنا أحد موقفين : (1) أن تقوم عدسة بتجميع الأشعة المتوازية في بؤرة أو (2) أن يقوم قدر طفيف من عدم التوازي يجعل الأشعة تلتقي في نقطة .

سيلغيه الربع الذى يعلوه مباشرة . وبالمثل يلغى الربعان العلويان كل منهما الآخر . ولذلك نشاهد الظلام الحادث عند هذه الزاوية .

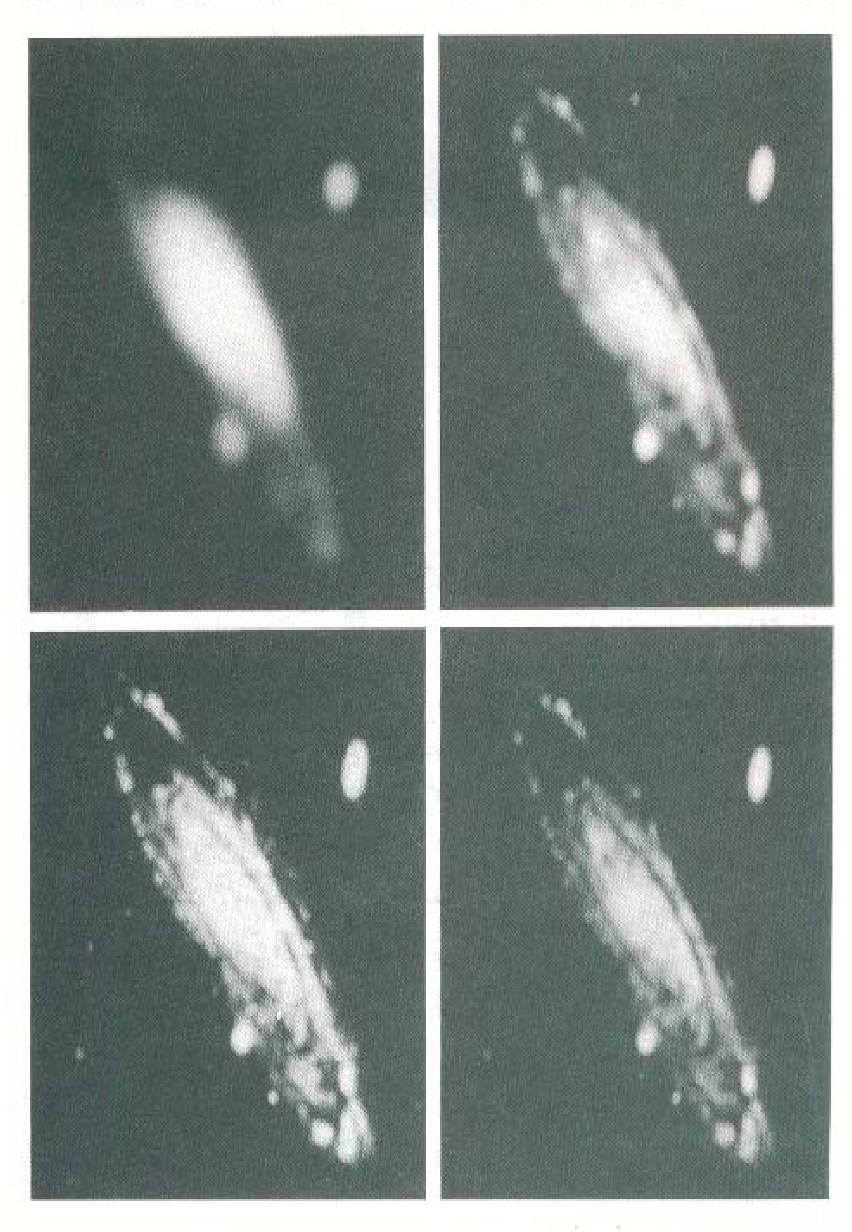
وأكثر السمات أهمية في نمط الشق المنفرد ـ والمتعلق بأغراضنا ـ هو موقع القيمة الدنيا التي تلي القيمة العظمى المركزية . فإذا رمزنا للزاوية الواقعة بين القيمة العظمى المركزية وأول قيمة دنيا ، بالرمز θ_c فإن :

$$\sin\theta_c = \frac{\lambda}{p} \tag{24-5}$$

وسوف نعود إلى استخدام هذه المعادلة في القسم التالي .

24-8 الحيود وحدود التحليل

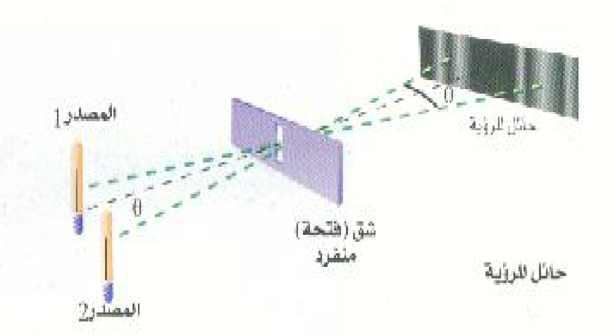
من أهم تبعات الحيود أنه يحد من قدرتنا على ملاحظة التفاصيل الدقيقة جدًا . ويمكننا إدراك هذه الصعوبة إذا رجعنا إلى الشكل 18-24 : حيث نرى مصدرين ضوئيين يبعثان



التقطت صور المجرة هذه عندما كانت فتحة التليسكوب آخذة في الكبر بالتدريج مما يبين كيف يتحسن تحليل الصورة وتفاصيلها مع ازدياد الفتحة .

الضوء عبر شق (فتحة) لينفذ إلى حائل للرؤية . وعندما تكون الفتحة صغيرة بما يكفى فإن الصور التى تظهر على الحائل ستكون مصحوبة بهدبات حيود ملحوظة كما هو مبين . وهذه الهدبات نتيجة لأن الضوء قد مر عبر الشق الذى عرضه b .

يمكنك أن تبدأ فى استيعاب الصعوبات التى تشكلها هذه الهدبات إذا تناولت المثال التقريبى التالى والذى سنعالجه لأبعد من هذا فيما بعد . سنعتبر أن إنسان العين سيناظر الفتحة تقريبًا ، وأن الخطين المرسومين على جسم ما تنظر إليه العين ، يناظران مصدرين ضوئيين فى الشكل 18-24 . وستمثل شبكية العين الحائل الذى تسقط عليه الصور . وحيث أن الصور الواقعة على الشبكية ستكون مشوشة بسبب ظاهرة الحيود المصاحبة لوجود الفتحة (إنسان العين) ، فإن العين ستُمنع من رؤية التفاصيل الدقيقة للجسم الذى تنظر إليه .



شكل 18-24:
لقد تم تحليل المصدرين جيدًا فوق الحائل لأن نمطى التداخل المناظرين لهما لم يتراكبا بشكل كبير .

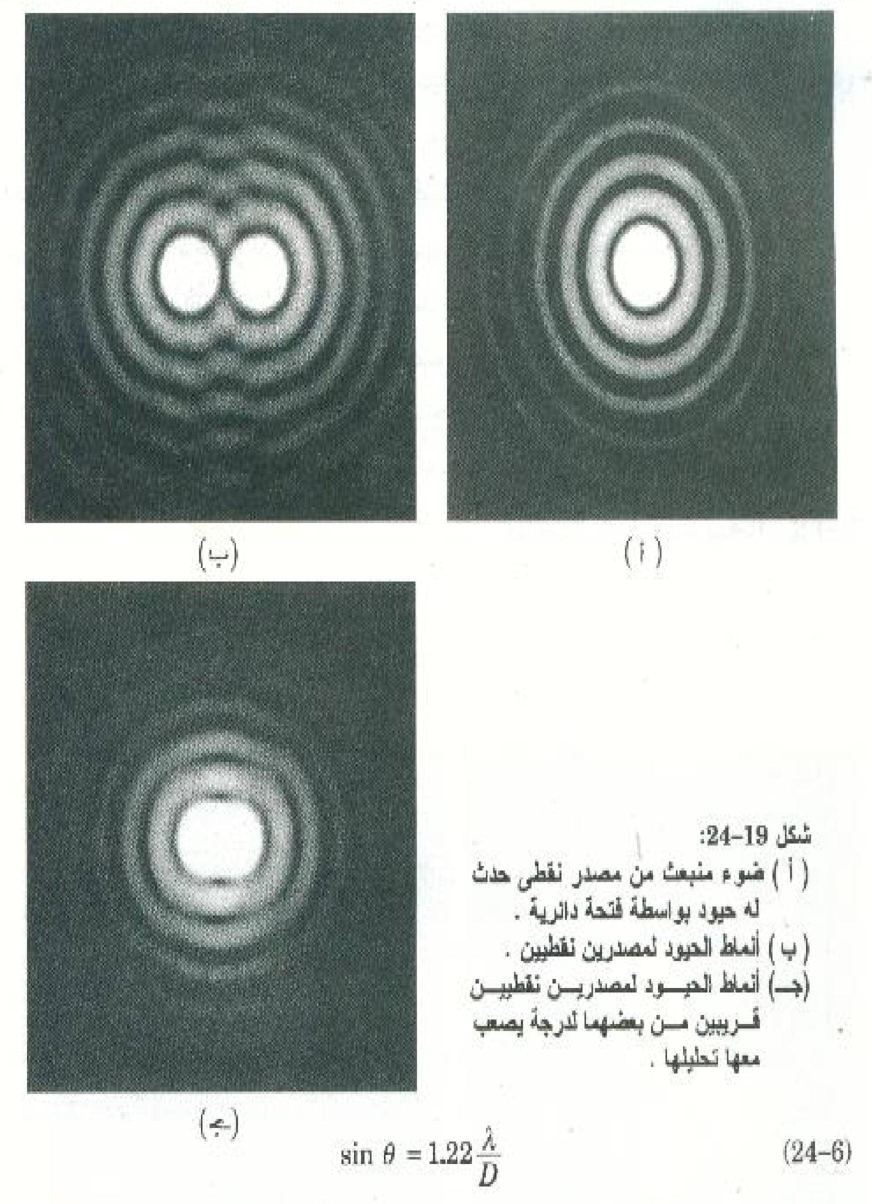
إذا عدنا سريعًا إلى الموقف المبين فى الشكل 18-24 ، فسنرى أن صورتى المصدرين على الحائل ستكونان منفصلتين طالما لم تكن الزاوية θ صغيرة جدًا . وتنشأ الصعوبة عندما تكون θ من الصغر بحيث يتراكب نمطا التداخل بشكل مؤثر ؛ وعندئذ لن يعود ممكنًا رؤية المصدرين منفصلين (أى لن يمكن **تحليلهما**) حيث يكونان قريبين من بعضهما بحيث تقع القيمة العظمى المركزية لأحد النمطين على القيمة الدنيا للنمط الآخر . وفى هذا الموقف ، حيث **يتحقق الحد الأدنى للتحليل** فإن $\theta = \theta_c$ ، حيث θ_c قد سبق تعريفها بالمعادلة 5-24 . **أى أننا لا نستطيع تحليل المصدرين إلا إذا كان الانفراج الزاوى بينهما θ أكبر من θ_c** . وكما نتوقع فإنه كلما كان عرض الفتحة b صغيرًا ، كلما كان لابد من تباعد الجسمين إذا أردنا تحليلهما لأن نمطى التداخل يصيران أعرض كلما صغر عرض الفتحة .

على الرغم من أن مناقشاتنا انصبت على حيود مصادر الضوء ، الناشئ عن فتحات (أو شقوق) ، إلا أن ظواهر مشابهة قد تحدث عندما نستبدل بالشق فجوة أو فتحة دائرية صغيرة . وتشمل أمثلة تلك الفتحات ، إنسان العين وقزحية عدسة آلة التصوير (الكاميرا) .

يبين الشكل 19-24 (أ) نمط الحيود الناشئ عن فتحة دائرية يضيؤها مصدر نقطى للضوء . ويعطى القطر الزاوى* للقيمة العظمى المركزية بالمعادلة :

---

* يشير مصطلح القطر الزاوى إلى الزاوية التى تصنعها القيمة العظمى المركزية لنمط الحيود عند مركز الفتحة . وبعبارة أخرى ، هى الزاوية التى تصنعها الخطوط المرسومة من مركز الفتحة إلى نقط تقع عند النهايات المقابلة لقطر القيمة العظمى المركزية .



شكل 19-24:
(أ) ضوء منبعث من مصدر نقطى حدث له حيود بواسطة فتحة دائرية .
(ب) أنماط الحيود لمصدرين نقطيين .
(جـ) أنماط الحيود لمصدرين نقطيين قريبين من بعضهما لدرجة يصعب معها تحليلها .

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \qquad (24\text{-}6)$$

حيث D هو قطر الفتحة . لاحظ التشابه بين هذه المعادلة والمعادلة 5-24 بالنسبة لفتحة عرضها d .

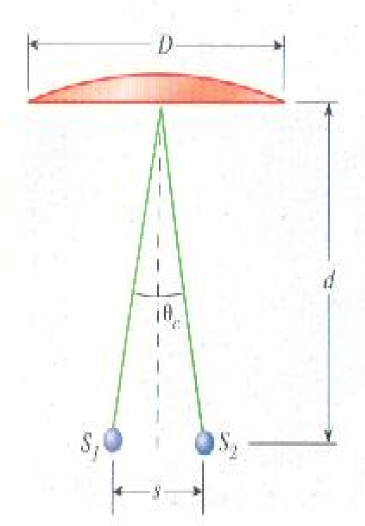
عندما يقترب مصدران نقطيان من بعضهما البعض فإن نمطى الحيود الناتجين عن الضوء المار عبر الفتحة سيأخذان فى التراكب حتى يندمجا فى النهاية فى نمط واحد كما فى الشكل 19-24 (ب) و (جـ) وحد تحليل المصدرين هو أن الانفراج الزاوى بين قيمتيهما العظميين المركزيتين لابد وأن يكون **على الأقل** مساويًا للعرض الزاوى لتلك القيم العظمى . وعلى ذلك يكون لدينا الشرط التالى :

تعطى الزاوية θ_c التى تحد من تحليل (تفريق) مصدرين نقطيين مرصودين من خلال فتحة قطرها D من المعادلة :

$$\sin \theta_c = 1.22 \frac{\lambda}{D} \qquad (24\text{-}7)$$

دعنا الآن نفحص نوع الحدود التى يفرضها تاثير الحيود على مقدرتنا على رؤية الأشياء بواسطة ميكروسكوب (مجهر) .

يوضح الشكل 20-24 عدسة ميكروسكوب واثنتين من تفاصيل جسم يفحص تحت الميكروسكوب يفصل بينهما مسافة مقدارها s ، أصغر بكثير عما هو مبين بالرسم . وقطر العدسة D وتبعد التفاصيل عن العدسة مسافة مقدارها d . إلى أى مدى يمكن أن تتقارب التفاصيل ومع ذلك يمكن تحليلها ؟



شكل 20-24:
يمكن التفريق بين اثنتين من تفاصيل جسم ما s_1 و s_2 عندما تكون $\theta = \theta_c$.

تنص المعادلة 7-24 على أن التفاصيل يمكن تحليلها إذا كانت الزاوية θ_c التى يصنعها هى $\sin^{-1}(1.22\,\lambda/D)$. ونرى من الشكل 20-24 أن

$$\sin\frac{\theta_c}{2} = \frac{s/2}{\sqrt{d^2+(s/2)^2}} \approx \frac{s}{2d}$$

لأن s أصغر بكثير فى الواقع من d .

وبالنسبة للزوايا الصغيرة ، فإن الزاوية مقاسة بالتقدير الدائرى مساوية لجيبها وحيث أن θ_c صغيرة جدًا فى العادة ، فإن بإمكاننا عندئذ أن نستبدل بالمقدار $\sin\ \theta_c$ الزاوية θ_c بالتقدير الدائرى ونحصل على :

$$\theta_c = \frac{s}{d}$$

وبإجراء نفس التقريب للمعادلة 7-24 ، فإن :

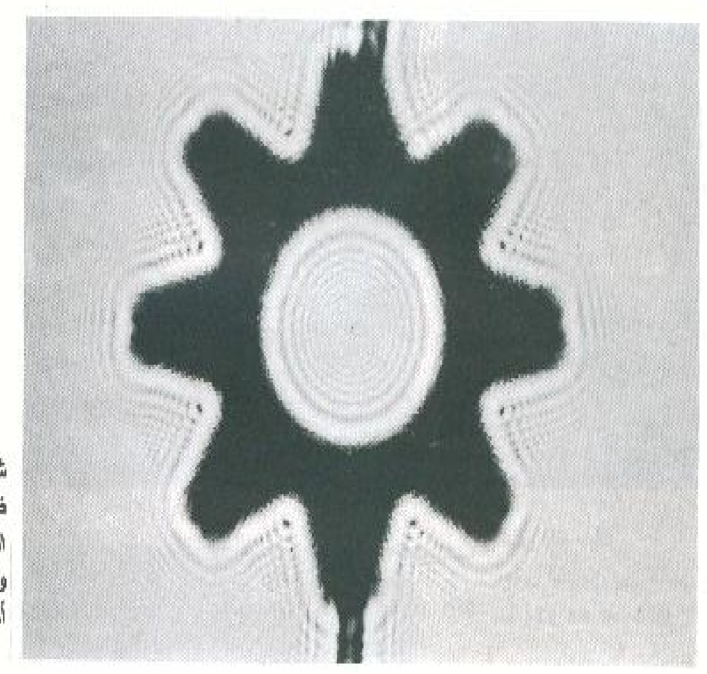
$$\theta_c = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

وبمساواة هاتين المعادلتين ؛ نحصل بسهولة على :

$$s = 1.22\left(\frac{d}{D}\right)\lambda$$

إذا رجعنا إلى الشكل 20-24 فسنجد أن المقدار (d/D) هو النسبة بين بعد الجسم وقطر العدسة . وهذه النسبة تقترب من الواحد الصحيح فى جميع الاستخدامات العادية للميكروسكوبات ويمكننا - نتيجة لذلك - وكتقريب أولى أن نعتبر $s \approx \lambda$. وبعبارة أخرى ، **فإن أصغر التفاصيل التى يمكن رؤيتها تحت ميكروسكوب هى التى لها نفس حجم الطول الموجى المستخدم تقريبًا** . وهذا قيد أساسى مفروض بالحيود ولا يمكن تجاوزه باستخدام عدسات مثالية الجودة أو ميكروسكوب عبقرى التصميم .

وهكذا نرى أن ظواهر الحيود تجعل الصور مشوشة ، والشكل 21-24 يصور مثالاً آخر على هذه الحقيقة ، حيث نجد أن ظل الفلكة المبين بالشكل قد أحيط بهدبات الحيود ، بل وقد يصبح الأمر أسوأ بالنسبة لأجسام أصغر من ذلك . وفى حالة ما إذا كان حجم الجسم مقاربًا للطول الموجى للضوء المستخدم ، فإن تفاصيل ذلك الجسم ستطمس تمامًا نتيجة الحيود ، وعلينا عندئذ أن نستنتج **أنه من المستحيل الحصول على صور لأجسام تقترب تفاصيلها فى الحجم من الطول الموجى للأشعة المستخدمة** .



شكل 21-24:
ظل فلكة على شكل نجمة ، وترى أشرطة الحيود داخل الثقب وحول الحواف الخارجية وتظهر الأجسام الأصغر من ذلك تشوشاً أكبر بسبب تنامى تأثيرات الحيود .

مثال 4-24

يبلغ قطر فتحة تليسكوب « هيل » على جبل بالومار بكاليفورنيا 5.0 m . ما هى أصغر زاوية بين نجمين يمكن التفريق بينهما بواسطة هذا التليسكوب ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد قيمة أصغر زاوية يمكن تحليلها ؟

الإجابة : إنه الطول الموجى للضوء المستخدم وقطر الفتحة التى يمر منها الضوء (المعادلة 7-24) .

سؤال : أى طول موجى على أن استخدم ؟

الإجابة : لقد كنا نتناول الضوء المرئى الذى يقع فى مدى ضيق من الأطوال الموجية . ولذا عليك استخدام طول موجى بالقرب من منتصف الطيف المرئى ، مثل 550 nm .

الحل والمناقشة : من المعادلة 7-24 :

$$\sin \theta_c = \frac{1.22(550 \times 10^{-9}\ \text{m})}{5.0\ \text{m}} = 0.134 \times 10^{-6}$$

وكما ذكرنا منذ قليل ، فإنه بالنسبة لقيم صغيرة للزاوية θ (مقاسة بالتقدير الدائرى) فإن $\sin\theta = \theta$. ولا شك أن القيمة التى حسبناها تصنف بسهولة على أنها صغيرة جداً .

ومن ثم :

$$\theta_c = 0.134 \times 10^{-6}\ \text{rad} = 7.68 \times 10^{-6}\ \text{deg.}$$

ولبيان مدى صغر هذه الزاوية ، فإن تليسكوب « هيل » يستطيع - نظرياً - أن يحلل جسماً حجمه 1 in يبعد ما يزيد على 100 mi !

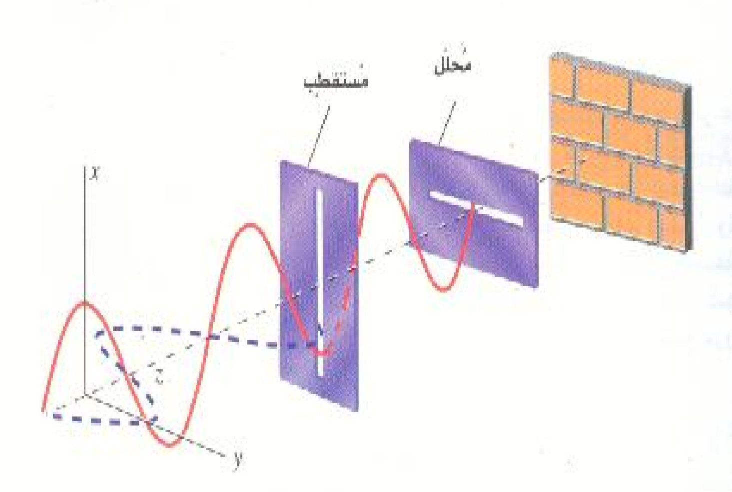
24-9 الضوء المستقطب

تظهر كل من الموجات المستعرضة والطولية ظواهر تداخل وحيود ، على أن هناك ظاهرة واحدة لا تتجلى إلا مع الموجات المستعرضة وهى : **الاستقطاب** . ويمكننا تصوير الاستقطاب إذا تخيلنا الموجات المستعرضة التى تنشأ فى حبل ؛ فقد ينشأ العديد من الموجات التى تهتز فى نفس الوقت فى الحبل وتتخذ اتجاهات متباينة ، بمعنى أن يتحرك بعضها فى المستوى الأفقى والبعض الآخر فى المستوى الرأسى بينما تبقى بعض الموجات التى لها مركبات فى كل من المستويين . ومثل هذه الموجات المختلطة يطلق عليها موجات **غير مستقطبة** . افترض الآن أن الحبل يمر من خلال شق رأسى ، سنسميه **مُستقطِب** كما هو موضح فى الشكل 22-24 . وسوف يوقف هذا الشق جميع المركبات الأفقية للموجات ولن يسمح سوى للحركة الموجية الرأسية بالمرور من خلاله . أى أن الموجة التى تتجاوز هذا المستقطب ستكون ذبذباتها فى مستوى واحد فقط ولذا فهى تسمى **موجة مستقطبة استوائيًا** . ويمكن فحص هذا الاستقطاب بإمرار الموجة المستقطبة خلال شق ثان بينه وبين الشق الأول زاوية مقدارها 90° . وسوف يقوم الشق الثانى - وسنسميه المُحَلِّل - بصد الموجة كما يبين الشكل 22-24 ؛ وبذلك لن تكتشف أية طاقة موجية فيما وراءه .



تظهر الإجهادات الداخلية فى مادة شفافة باستخدام الضوء المستقطب ؛ حيث يكون الإجهاد أكبر ما يمكن فى المناطق التى يتغير فيها اللون أسرع من غيرها .

وعلى الجانب الآخر ، فالموجات الطولية مثل موجات الصوت تتكون من جزيئات تتذبذب فى نفس اتجاه انتشار الموجة ولذلك لا يؤثر الشق فى الحركات الطولية . أى أن الموجة الطولية غير قابلة للاستقطاب . ولإثبات أن موجة ما مستعرضة فكل ما نحتاجه هو بيان أنها قابلة للاستقطاب .



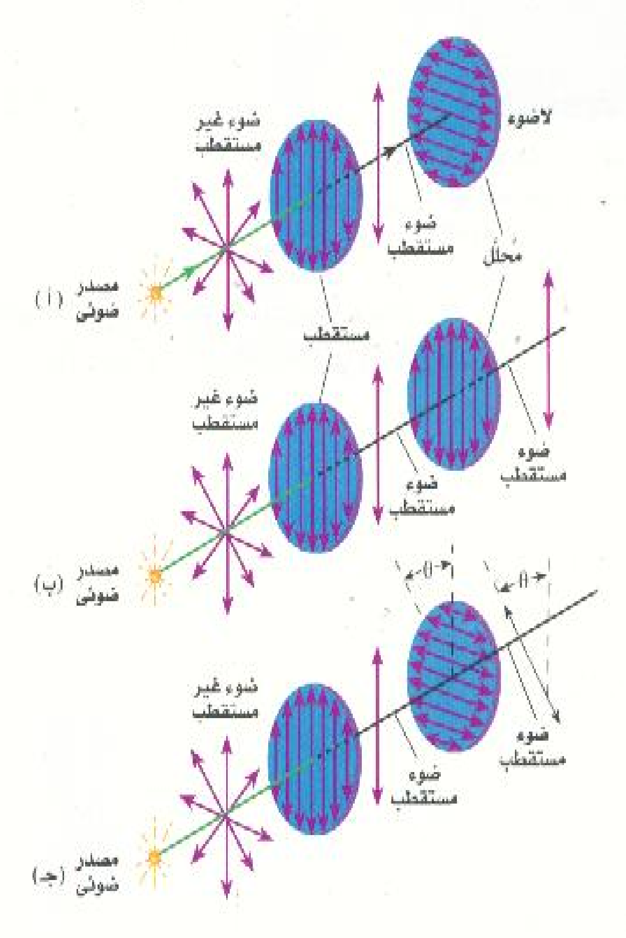
شكل 22-24:
الاستقطاب المشاهد فى الموجات الحادثة فى حبل مشدود شبيه باستقطاب الضوء .

هناك عدد من الوسائل التى يمكن بواسطتها استقطاب الضوء ، واثنتان من تلك الوسائل تتمان إما بالانعكاس وسنناقشها لاحقًا فى هذا القسم ، والأخرى بجعل الضوء يمر عبر مادة مستقطبة . وهذه الوسيلة شبيهة جدًا بالتى يقوم بها الشق باستقطاب موجة فى حبل . ومثل تلك المادة المستقطبة يصنع من غشاء شفاف به بلورات إبرية الشكل من مادة يودوكبريتات الكينين* والتى ترتب فى اتجاه واحد معين . وتتمتع هذه

* تعرف هذه الأغشية تجاريًا باسم « بولارويد » وقد اخترعها ادوين . هـ . لاند عام 1934 .

البلورات بخاصية السماح للمجال الكهربي بالمرور عبرها في الاتجاه المتعامد مع طول البلورات فقط . ولذلك فإن الضوء غير المستقطب سوف يصبح مستقطبًا استوائيًا بعد مروره عبر تلك المادة . ويمكن بيان ذلك عند إمرار هذا الضوء عبر لوح مستقطب ثان تتجه بلوراته بزاوية مقدارها 90° بالنسبة لبلورات اللوح الأول . وهذا من شأنه أن يصد جميع الضوء المتبقي (وهو يفعل ذلك فعلاً) .

ويبين الشكل 23–24 تفاصيل هذه الظاهرة ؛ ففي الجزء (أ) يسقط ضوء غير مستقطب على المستقطب الأول الذي يسمح للضوء المستقطب رأسيًا فقط أن يمر ، وتبين الأسهم الأرجوانية **محور النفاذ** في المستقطب وهو متعامد مع بلورات الأيودوكبريتات . وعندما يكون محور النفاذ في المستقطب الثاني ـ أو المحلل ـ متجها بزاوية مقدارها 90° مع المستقطب الأول (الشكل 23–24 (أ)) فإن كل الضوء يُصد ويمنع من المرور .



شكل 23–24:
يصبح الضوء مستقطبًا استوائيًا إذا مر عبر مستقطب . ويمر كل الضوء أو بعضه أو لا شيء منه على الإطلاق عبر المحلل ، اعتمادًا على اتجاه محوري النفاذ النسبي . وتشير الأسهم المرسومة على اللوحين المستقطبين إلى اتجاهات مركبات متجهات المجال الكهربي المستعرضة والتي يسمح بمرورها كل لوح .

والمحلل في الجزء (ب) متجه في نفس اتجاه المستقطب الأول وبذلك يسمح لكل الضوء المستقطب رأسي بالمرور . أما إذا كان محور النفاذ بالمحلل مائلا بزاوية مقدارها θ على محور المستقطب ، كما في (جـ) فإن الضوء المستقطب في مستوى محور المحلل هو الذي سينفذ .

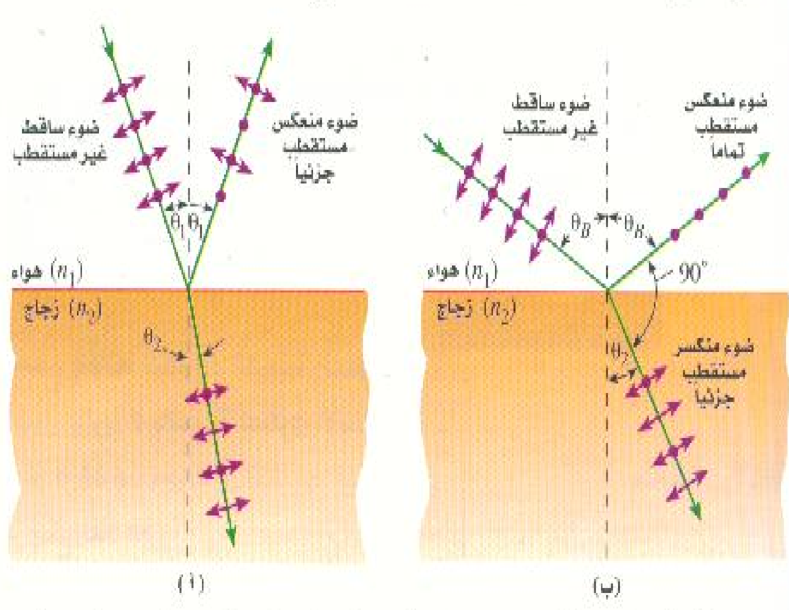
والمجال الكهربي في الضوء غير المستقطب يتجه في جميع الاتجاهات بالتساوي عموديًا على اتجاه انتشار الضوء . وعند استعمال مستقطب منفرد يسمح لمستوى واحد من التذبذب بالنفاذ ، فإن شدة الضوء النافذ تنخفض إلى نصف قيمتها التي في الضوء الساقط غير المستقطب . وعندما يكون محور النقل بالمحلل مائلا بزاوية مقدارها θ بالنسبة للمجال الكهربي للضوء الساقط على المحلل ، فإن المركبة $E \cos \theta$ للمجال هي

فقط التي سيسمح لها بالنفاذ . وحيث أن شدة الضوء تتناسب مع مربع سعة المجال ، فإنه يتضح أن الشدة النافذة من المحلل كما في الجزء (جـ) هي :

$$I_{\text{transmitted}} = I_{\text{incident}} \cos^2 \theta \tag{24-8}$$

ومن التطبيقات الشائعة للمبادئ المستخدمة في صناعة أغشية البولارويد استعمالها في بعض النظارات الشمسية ، فإلى جانب أنها ملونة لخفض نفاذ الضوء ، فإنها مصممة بحيث تكون محاور النفاذ بالأغشية رأسية عندما تلبس النظارة . وتقلل مثل تلك النظارات من « الوهج » لأن الضوء إذ ينعكس من أسطحها المستوية ، يصبح مستقطبًا جزئيًا في اتجاه يوازي السطح العاكس . وأسطح المياه والطرق تقوم بدور الأسطح العاكسة ولذلك تتمتع النظارات المستقطبة بشعبية خاصة عند من يمارسون الصيد أو يقضون فترات طويلة في القيادة .

تعتمد درجة استقطاب الضوء المنعكس على زاوية سقوط الضوء على السطح العاكس ومعامل انكسار المادة العاكسة . وهناك زاوية سقوط واحدة خاصة تسمى **زاوية بروستر** (θ_B) التي يصبح فيها الضوء المنعكس مستقطبًا بنسبة مائة في المائة . ويحدث هذا عندما يتعامد اتجاه الضوء المنعكس على اتجاه الضوء المنكسر داخل السطح . والشكل 24-24 يصور هذا الموقف في حالة الحد الفاصل بين الهواء والزجاج .



شكل 24-24: (أ) استقطاب جزئي لضوء غير مستقطب أصلاً ، بواسطة الانعكاس من على سطح لوح زجاجي . (ب) استقطاب تام للضوء بواسطة الانعكاس من على لوح عند زاوية بروستر θ_B ، حيث $\tan\,\theta_B = n_1/n_2$ تتعامد — هنا — الموجات المنعكسة والمنكسرة ، وتكون كل متجهات المجال الكهربي في الضوء المنعكس موازية لسطح اللوح الزجاجي .

نستطيع الآن أن نطبق قانون « سنل » لنتعرف على كيفية اعتماد θ_B على المواد المستخدمة ، بالرجوع إلى الشكل 24-24 (ب) ، نجد أن

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_2$$

وباستعمال بعض المتطابقات من حساب المثلثات (عليك التحقق من هذه العلاقات إذا بدا أنها غير مألوفة لديك) . ونجد أن :

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin (90 - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

إذا قسمنا أحد طرفي المعادلة على الطرف الآخر ، وتذكرنا أن $\tan \theta = \dfrac{(\sin \theta)}{(\cos \theta)}$ ،

فإننا نصل إلى معادلة بسيطة لزاوية « بروستر » :

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} = n \qquad \text{أو} \qquad \theta_B = \tan^{-1} n \qquad (24\text{-}9)$$

وكما هو الحال في جميع تطبيقات قانون سنل ، فإن θ_B تقاس بالنسبة للعمود المقام على السطح العاكس . والمقدار n في المعادلة (9-24) هو معامل انكسار الوسط الكاسر للضوء بالنسبة للوسط الذي يسقط فيه الضوء . ويلاحظ من الشكل 24-24 أن الضوء المنعكس يكون مستقطبًا بحيث يتوازى مجاله الكهربي مع السطح ، كما يلاحظ أن الشعاع المنكسر مستقطب جزئيًا .

مثال 24-5

ما هي الزاوية التي ينعكس بها الضوء الساقط من على سطح بحيرة بحيث يصبح مستقطبًا تمامًا ؟ وإذا كنت ترتدي نظارات شمسية مستقطبة وأدرت رأسك بزاوية مقدارها 20° بعيدا عن الخط الرأسي فما هو كسر شدة الضوء المنعكس الذي سيصل إلى عينيك ؟ اعتبر أن العدسات المستقطبة غير ملونة .

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو الشرط اللازم لحدوث استقطاب تام بالانعكاس ؟

الإجابة : أن يكون اتجاه الضوء المنعكس متعامدًا مع اتجاه الضوء المنكسر . ويتحقق هذا الشرط إذا سقط الضوء بزاوية « بروستر » .

سؤال : على أي كميات تعتمد زاوية « بروستر » ؟

الإجابة : تبين المعادلة 9–24 أن $\theta_B = \tan^{-1} n$ ، حيث $n = n_2/n_1$. ومن الجدول 2–23 نجد أن $n_2 = 1.33$(للماء) و $n_1 = 1.0$(للهواء) .

سؤال : ما الذي يحدد كسر الشدة التي تسمح بنفاذها النظارات الشمسية المستقطبة ؟

الإجابة : إذا كان محور النفاذ بالمحلل يميل بزاوية θ بالنسبة لمستوى الاستقطاب ، فإن كسر الضوء النافذ هو $\cos^2\theta$ (من المعادلة 8–24) . وحيث أن النظارات غير ملونة ، فيمكنك اعتبار أنه لا يوجد أي عامل آخر يمنع نفاذ الضوء .

سؤال : ما مقدار θ إذا أدير الرأس بزاوية مقدارها 20° مع الرأسي ؟

الإجابة : تصنع النظارات الشمسية بحيث يكون محور النفاذ رأسيًا عندما يكون رأس الشخص في وضع رأسي . ويكون مستوى الاستقطاب أفقيًا . ومن ثم $\theta = 70°$.

الحل والمناقشة : زاوية بروستر للحد الفاصل بين الهواء والماء هي

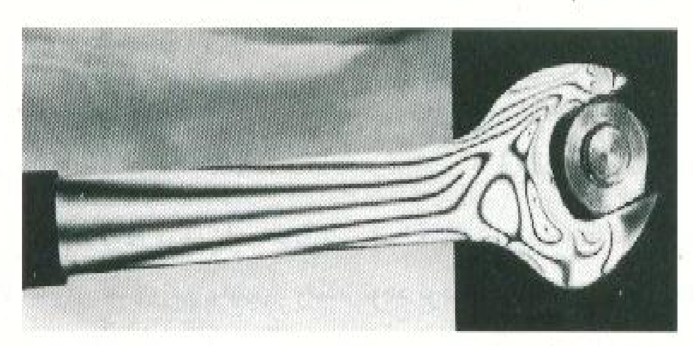
$$\theta_B = \tan^{-1} 1.33 = 53.1°$$

تذكر أن هذه الزاوية مقاسة بالنسبة للخط الرأسي . وكسر الضوء المستقطب الذي ينفذ من خلال العدسات هو

$$\frac{I_{\text{transmitted}}}{I_{\text{incident}}} = \cos^2 70° = 0.117 = 11.7\%$$

جدير بالملاحظة أيضًا أن شدة الضوء المستقطب كليًا والخارج من الماء هي 50 بالمائة من شدة الضوء الساقط على الماء . فإذا ارتديت نظارات مستقطبة فلعلك قد لاحظت تغير شدة الضوء النافذ إلى عينيك عندما تميل برأسك ، حتى وإن كان الضوء مستقطبًا جزئيًا .

يستخدم استقطاب الضوء في العديد من التطبيقات العلمية والتقنية . فالتفاصيل تبدو أوضح تحت الميكروسكوب ، مثلاً ، إذا تم فحصها بين لوحين مستقطبين متعامدين . فالأجزاء التى قد تبدو متشابهة فى الضوء العادى ؛ يمكن أن تختلف بشدة فى مقدرتها على تغيير استقطاب الضوء النافذ . ومن ثم فإن التفاصيل التى لا يمكن ملاحظتها فى ظروف معينة ؛ تصبح أكثر وضوحًا ومن السهل رؤيتها . وعندما يوضع جسم شفاف تحت إجهاد مرتفع ، فإن هذا الإجهاد يؤدى غالبًا إلى دوران مستوى استقطاب الضوء النافذ . ونتيجة لذلك فإن الجسم الواقع تحت تأثير إجهادات غير منتظمة سيُظهر حين يوضع بين مستقطبين متعامدين أشرطة متبادلة ما بين مظلم ومضئ كما فى الشكل 25-24 . وحيثما تكون الأشرطة أكثر تكدسًا يكون الإجهاد فى أقصى حالات عدم الانتظام . وبفحص النماذج المصنوعة من البلاستيك لأجسام منفعلة مثل التى فى الشكل 25-24 فإنه يصبح ممكنًا الحكم بدقة على كيفية توزيع الإجهادات . وهذا الأمر على قدر كبير من الأهمية بالنسبة لتصميم الأجزاء المختلفة للآلات .



شكل 25-24: يظهر الجسم الواقع تحت تأثير الانفعالات ، أشرطة متبادلة ما بين مظلم ومضئ عندما يوضع بين شريحتين متقاطعتين (متعامدتين) من البولارويد . ويكون تغير الإجهاد أكثر ما يمكن حيث تكون الأشرطة أكثر قربًا وتكدسًا من بعضها البعض .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الحيود ، (ب) مبدأ هيجنز ، (جـ) رقم رتبة الهدبة أو خط الطيف ، (د) الموجات الترابطة ، (هـ) حلقات نيوتن ، (و) طول المسار البصرى المكافئ ، (ز) محزوز الحيود ، (ح) الزاوية المحددة للتحليل (التفريق) ؛ (ط) زاوية بروستر .

2 أن تصف تجربة موجات مائية ، تمثل ظاهرة الحيود .

3 أن توضح العلاقة الطورية لموجتين متماثلتين إذا كانتا ستتداخلان (أ) بشكل بنَّاء ، و (ب) بشكل هدَّام .

4 أن تصف تجربة يونج وكيف يتم الحصول على حزمتين مترابطتين فيها . وأن توضح باستخدام الرسوم السبب فى أن هاتين الحزمتين يمكنهما التداخل بشكل هدَّام وبشكل بنَّاء عند النقط المختلفة . وبأخذ الرسم فى الاعتبار ، أن تبرر صحة العلاقة : $n\lambda = d \sin \theta_n$ بالنسبة لمواقع الهدبة المضيئة .

5 أن تستخدم نمط التداخل من شق مزدوج لكي تعين λ إذا علمت ما يكفي من البيانات .

6 أن تحسب المسار البصري المكافئ لسمك مقداره L لمادة معامل انكسارها n .

7 أن تشرح كيفية الحصول على تداخل باستخدام غشاء رقيق أو إسفين وأن تذكر السبب في أن الهدبات تكون ملونة عند استخدام ضوء أبيض . أن تحسب اختلاف سمك الإسفين فيما بين هدبة مظلمة وهدبة مضيئة مجاورة لها .

8 أن تشرح كيفية استخدام محزوز الحيود لقياس الطول الموجي لخط من خطوط الطيف .

9 أن تصف ما يحدث لحزمة ضوئية تنفذ من فتحة إذا جعلت هذه الفتحة ضيقة جدًا . وأن تلتفت بشكل خاص إلى ما يحدث عندما يقترب عرض الفتحة من λ . أن تشرح أهمية هذا التأثير في مقدرتنا على مشاهدة التفاصيل .

10 أن تحسب زاوية السقوط التي من شأنها إنتاج شعاع منعكس ومستقطب تمامًا ، إذا علمت قيمة معامل انكسار مادة السقوط ومادة الانكسار .

11 أن تحسب كسر شدة الضوء المسموح له بالنفاذ عبر لوحي استقطاب يميل محورا النفاذ فيهما بزاوية θ بالنسبة لبعضها البعض .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

الحيود

هو الظاهرة التي بمقتضاها تنحني الموجات لتصل إلى المنطقة التي ما وراء العوائق . ويصبح الحيود ملموسًا عندما يكون قطر العائق مقارب للطول الموجي للموجات .

مبدأ هيجنز

تعمل كل نقطة على جبهة الموجة عمل مصدر نقطي لموجات جديدة .

التداخل

يصف التداخل تراكب سعات موجتين أو أكثر في مكان وزمان معينين . وعندما توجد موجتان متماثلتان وبينهما اختلاف مقداره نصف موجة في الطور فإن السعات يلغي بعضها بعضًا . أما إذا كانت الموجتان متفقتين في الطور فإن سعتيهما تجمعان بشكل بنّاء .

تداخل مصدرين (تجربة يونج)

عندما تفصل مسافة مقدارها d بين مصدرين للموجات ، يبثان موجات متماثلة في الطور فإن تداخلاً بناءً يحدث بين الموجتين في اتجاه يعطى بالمعادلة :

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

حيث تقاس الزاوية θ بالنسبة لخط يقع في منتصف المسافة بين المصدرين ، باعتبار النقطة الواقعة بين المصدرين هي نقطة الأصل و m أي رقم صحيح . وتسمى قيمة m رتبة التداخل البنّاء .

ويحدث التداخل الهدّام عند زوايا تحقق المعادلة

$$\sin \theta_m = (m + \frac{1}{2})\,\lambda$$

طول المسار البصري المكافئ

للطول L من مادة معامل انكسارها n طول مسار بصري مكافئ L_{opt} يعطى من :

$$L_{opt.} = nL$$

ويعنى هذا أن نفس عدد الموجات موجود فى السمك L من المادة وكذلك فى سمك مقداره $L_{opt.}$ من الفراغ .

اختلاف طور الموجات المنعكسة

عندما تنعكس موجة تنتشر فى وسط معامل انكساره n_1 بواسطة وسط معامل انكساره $n_2 > n_1$ فإن الموجة المنعكسة ستعانى من اختلاف فى الطور مقداره نصف دورة بالنسبة للموجة الساقطة . وإذا كان $n_2 < n_1$ فإن الانعكاس لا يحدث أى اختلاف فى الطور .

التداخل فى الأغشية الرقيقة

فى حالة السقوط العمودى ، فإن التداخل يحدث بين الضوء المنعكس من السطح العلوى والسطح السفلى للغشاء الرقيق (الذى سمكه L ومعامل انكساره n) طبقًا للقاعدة التالية :

- إذا لم يعان أحد الشعاعين أو كلاهما اختلافًا فى الطور عند الانعكاس فإن انعكاسًا مضيئًا ينتج عندما يكون المسار البصرى جيئة وذهابًا عبر الغشاء يساوى عددًا صحيحًا من الأطوال الموجية .

- إذا عانى أحد الشعاعين (أى منهما) اختلافًا فى الطور عند الانعكاس فإن انعكاسًا مضيئًا ينتج عندما يكون المسار البصرى جيئة وذهابا عبر الغشاء يساوى عددًا فرديًا من أنصاف الأطوال الموجية .

محزوز الحيود

يتكون محزوز الحيود من عدد كبير من الفتحات (الشقوق) الضيقة والقريبة جدًا من بعضها البعض . ويتداخل الضوء النافذ من خلال المحزوز بشكل بنَّاء عند زوايا محددة بدقة فحسب ، على أن تخضع هذه الزوايا لمعادلة المحزوز :

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

حيث d هو التباعد بين فتحتين متجاورتين .

الحيود من شق (فتحة) منفردة

نعطى قيمة الزاوية θ_c المحصورة بين القيمة العظمى المركزية ومركز القيمة الدنيا الأولى فى نمط حيود من الرتبة الأولى بالمعادلة :

$$\sin \theta_c = \frac{\lambda}{b}$$

حيث b هو عرض الفتحة .

قيود الحيود على التحليل (التفريق) الزاوى

يعتبر العرض الزاوى لدائرة الضوء المركزية فى نمط حيود ناشئ عن فتحة دائرية هو الحد النهائى للتحليل أو التفريق بالنسبة لصور مصدرين نقطيين . ويعطى هذا الحد بالمعادلة :

$$\sin \theta_c = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

حيث D هو قطر الفتحة .

الاستقطاب عن طريق الانعكاس (زاوية بروستر θ_B)

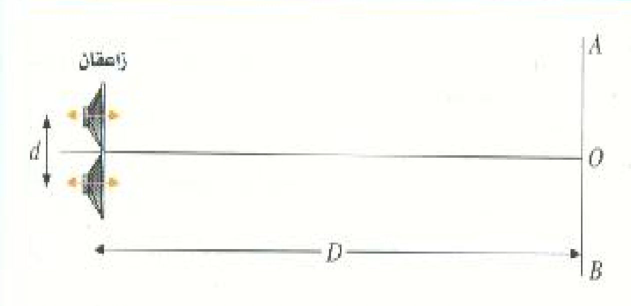
يستقطب الضوء تمامًا بواسطة الانعكاس من على حد فاصل عندما تكون الزاوية بين الشعاع المنعكس والشعاع المنكسر $90°$. وتسمى زاوية السقوط المناظرة لذا الموقف زاوية بروستر ، θ_B ، وتعطى بالمعادلة :

$$\theta_B = \tan^{-1} n$$

حيث n معامل انكسار الوسط العاكس بالنسبة للوسط الذى تسقط منه الأشعة .

أسئلة وتخمينات

1 يتصل الزاعقان المبينان في الشكل م 1-24 بنفس المذبذب (مولد الذبذبات) ويرسلان من ثم موجات صوتية متماثلة . ما هي الشروط التي يمكنك بموجبها أن تلاحظ تأثيرات التداخل إذا سرت على امتداد الخط AB ؟ ماذا يحدث لو حل مصباحان ضوئيان (بصيلتان) محل الزاعقين ؟



شكل م 1-24

2 تقف سيارتان جنبًا إلى جنب في موقف شاغر ضخم للسيارات . وكان نفيراهما « يصرخان » . هل تتوقع أن تتمكن من ملاحظة أية تأثيرات للتداخل من مصدري الصوت ؟ ماذا يحدث لو حل كمانان يعزفان نفس النغمة محل النفيرين ؟

3 يتكون ظل عمود للتليفونات بوضوح نتيجة وجود ضوء صادر من مصدر بعيد . لم لا يلاحظ مثل هذا الأثر (الظاهرة) بالنسبة لصوت صادر من نفير سيارة بعيدة ؟

4 لماذا كان مستحيلاً أن نحصل على هدبات تداخل في تجربة شق مزوج ، عندما يكون التباعد بين الفتحتين أقل من الطول الموجي للضوء الساقط عليهما ؟

5 ابتكر تجربة شق مزدوج ليونج بالنسبة للصوت مستخدمًا زاعق منفرد كمصدر للموجات .

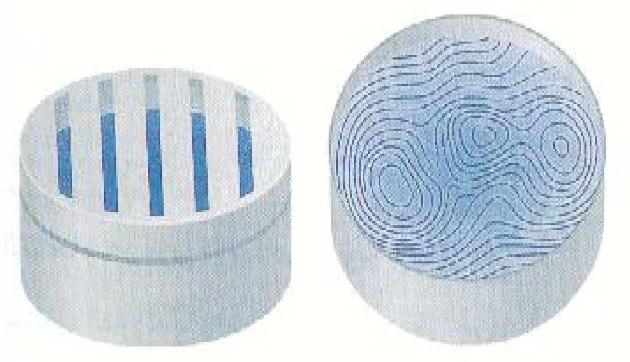
6 يتكون ضوء الزئبق من عدة أطوال موجية . افترض أننا استخدمنا مرشحين في تجربة الشق المزدوج بحيث يمر ضوء (أزرق) $\lambda = 436$ nm عبر إحدى الفتحتين ويمر ضوء (أخضر) $\lambda = 546$ nm عبر الفتحة الثانية . هل يمكن أن نشاهد نمط تداخل على الحائل ؟

7 ما هو التغير الذي يطرأ في تجربة الشق المزدوج ليونج عندما يغمر الجهاز بأكمله في الماء بدلاً من وجوده في الهواء ؟ وما هو التغير الذي يشاهد في تجربة حلقات نيوتن إذا ملئ الحيز بين الشريحة الزجاجية والعدسة بالماء ؟

8 ترسب أغشية رقيقة أحيانًا على شرائح زجاجية . ويمكننا التحكم في سمك الغشاء بمراقبة التغير في لون الضوء الأبيض المنعكس من سطحه ، كلما زاد سمك الغشاء . اشرح هذه الظاهرة .

9 لماذا يقوم سطح معدني أو زجاجي عليه غشاء رقيق من الزيت ، بعكس ألوان قوس قزح في أغلب الأحيان عندما ينعكس عليه ضوء أبيض ؟

10 يصور الشكل م 2-24 هدبات تداخل تشاهد عندما توضع شرائح زجاجية على أسطح مستوية بصريًا (وتسمى **أسطح بصرية الاستواء**) . اذكر ما تعرفه عن سطح الشريحتين المستخدمتين هنا .



شكل م 2-24

11 افترض أن فتحتين (شقين) إضافيتين قد أضيفتا إلى الشقين الأصليين في تجربة الشق المزدوج ليونج ، بواقع فتحة إلى جانب كل من الفتحتين الأصليتين ، بحيث صار هناك أربع فتحات ذات تباعد متساوي . وقد لوحظ أنه عند مسافة معينة بين الفتحات والحائل ، تكون النقطة المركزية لنمط الهدبات مظلمة . فسر كيفية حدوث هذه الظاهرة ؟

12 اشرح العبارة التالية : يكون الفرق فى السمك بين موضع هدبتين مضيئتين متجاورتين فى نمط تداخل غشاء رقيق هو صفر أو $\lambda/2n$ ، حيث λ هو الطول الموجى للضوء المستخدم و n معامل انكسار مادة الغشاء .

13 هل من اللازم أن تكون قوة تفريق الميكروسكوب أفضل إذا استخدم ضوء أزرق بدلاً من الضوء الأحمر ؟ اشرح .

14 هب أنك أعطيت محزوز حيود ثوابته معروفة ؛ كيف تستخدمه فى تعيين الطول الموجى لأحد خطوط الطيف المجهولة ؟

15 اضغط شريحتين من الزجاج المسطح بضمهما معًا بقوة (تعتبر شريحتا الميكروسكوب مثاليتين فى هذه التجربة) وبطرق متعددة ثم حاول أن تقدر من تداخل الضوء مدى التصاق السطحين معًا . (تستطيع رؤية نمط التداخل بسهولة فى أية غرفة مضاءة **بشرط** ضغط الشريحتين معًا بدرجة كافية) .

16 إذا اعتبرت أن الحيود الناشئ عن إنسان عينك هو العامل المحدد ، فكم يكون بعد سيارة قادمة فى اتجاهك إذا بدأ مصباحاها الأساسيان فى التفرق عن بعضهما ؟

17 ما الذى يحدث للطاقة الضوئية التى لا ينفذها لوح استقطاب عندما يسقط عليه ضوء غير مستقطب ؟ هل يمكنك التفكير فى أية عيوب تتعلق باستعمال لوح الاستقطاب ؟

18 كيف يمكن لنا أن نحدد ما إذا كانت حزمة الضوء مستقطبة أم لا ؟ وما إذا كانت تتألف من حزمتين إحداهما مستقطبة والأخرى غير مستقطبة ؟

مسائل

القسمان 24–1 و 24–2

1 يقوم مصدران موجيان متماثلان يقعان عند نقطة أصل الإحداثيات بإرسال موجات متفقة فى الطور وذات طول موجى مقداره 60 cm نحو مشاهد يقف على المحور x عند $x = 6.0$ m . ثم حرك أحد المصدرين ببطء على طول المحور بعيدًا عن المشاهد . ما هى أول ثلاث إحداثيات على محور x لهذا المصدر يمكن للمشاهد عندها أن يكتشف (أ) تداخلاً بنَّاءً و (ب) تداخلاً هدَّامًا ؟

2 افترض أن المصدرين المذكورين فى المسألة السابقة يقعان عند نقطة الأصل ويرسلان موجات ذات طول موجى معروف ومتفقة فى الطور . وعندما يُحرك مصدر منهما ببطء فى اتجاه القيم السالبة للإحداثى x ، فإن المشاهد يلاحظ تداخلاً بناءً عند نقط متعددة على محزوز x ، وكانت المسافة بين نقطتين متجاورتين من تلك النقط هى 20 cm . ما هو الطول الموجى للموجات ؟

3 تبث محطة إذاعية موجات طولها الموجى 320 m . ويقوم جهاز استقبال منزلى (راديو) يبعد بمسافة 16 km عن المحطة باستقبال تلك الموجات حال وصولها إليه عن طريقين . وأحد الطريقين مباشر من المحطة أما الثانى فهو الطريق الذى تسلكه الموجات بعد انعكاسها من جبل يقع وراء المنزل الذى به الراديو مباشرة . أوجد أدنى مسافة بين الجبل والجهاز (الراديو) بحيث يحدث تداخل هدَّام عند الجهاز . اعتبر عدم وجود تغير فى الطور عند الانعكاس من على الجبل .

4 يبين الشكل م 24–1 مصدرى صوت متماثلين يهتزان معًا فى نفس الطور ويبثان موجات طولها الموجى 20 cm . ويسمع الحد الأقصى والحد الأدنى للصوت عند تحريك جهاز استقبال على طول الخط AB . ما مقدار فرق المسار بين المصدرين عند (أ) أول قيمة عظمى عند أحد جوانب O و (ب) ثانى قيمة دنيا عند أحد جوانب O ؟

■ 5 يبعث مصدرا الصوت المتماثلان المبينان فى الشكل م 24–1 موجات متفقة فى الطور . ويلاحظ مشاهد عند النقطة A حدوث صوت مرتفع عندما يصنع خط ممتد من منتصف المسافة بين المصدرين والنقطة A زاوية مقدارها 30° مع الخط الممتد من منتصف المسافة بين المصدرين والنقطة O . فإذا كان $d = 30$ cm ، فما هو الطول الموجى الممكن لموجات الصوت ؟ اعتبر أن $d \ll D$.

■ 6 يهتز مصدرا صوت متماثلان متفقان فى الطور ويبعثان بموجات طولها الموجى 60 cm نحو أحدهما الآخر على المحور x .

ويقع المصدران عند $x = 0$ و $x = 6.0\ m$ على الترتيب . عند أية نقط على المحور x بين المصدرين يكون الصوت الإجمالي (أ) عند أقصى قيمة له و (ب) عند أدنى قيمة ؟

■ 7 يهتز مصدرا موجات لاسلكي متماثلان وترددهما متغير بحيث يكونان متفقين في الطور . ويرسلان موجات نحو أحدهما الآخر على طول المحور x . ويفصل بين المصدرين على محور x مسافة مقدارها $4.0\ km$. ثم وضع جهاز استقبال (راديو) منزلي بينهما على مسافة مقدارها $2.5\ km$ من أحد المصدرين . وتمت زيادة الترددات المتساوية للمصدرين بدءاً من الصفر في نفس الوقت . ولوحظ أن الشدة المركبة للموجات اللاسلكية الملتقطة بالجهاز تتناقص مع زيادة التردد حتى تصل إلى قيمتها الدنيا ثم تبدأ في الزيادة مرة أخرى . ما هو الطول الموجي للموجات اللاسلكية عند نقطة الشدة الدنيا ؟

القسم 3-24

8 استخدم ضوء أحادي اللون طوله الموجي $436\ nm$ في تجربة الشق المزدوج ليونج ، فوجد أن القيمة العظمى للرتبة الأولى تحدث عند $3.2°$. (أ) ما هو التباعد بين الفتحتين ؟ (ب) وما هي الزاوية التي تحدث عندها القيمة العظمى للرتبة الثانية ؟

9 المسافة بين الفتحتين في تجربة الشق المزدوج ليونج هي $0.10\ mm$ ، والطول الموجي للضوء المستخدم هو $600\ nm$. (أ) ما هي الزاوية التي تحدث عندها القيمة العظمى للرتبة الثالثة ؟ (ب) والقيمة العظمى للرتبة الخامسة ؟

10 يسقط ضوء أخضر طوله الموجي $550\ nm$ على زوج من الفتحات الضيقة التي تفصل بينها مسافة مقدارها $0.5\ mm$. ما هي الزاوية التي تشاهد عندها القيمة العظمى للرتبة الثانية ؟

11 يبعث مصدرا الصوت المبينان في الشكل م 1-24 موجات متفقة في الطور وطولها الموجي $60\ cm$. فإذا كان $d = 6.0\ m$ و $D = 30\ m$ فعلى أي بعد على طول AB من O تكون (أ) القيمة العظمى للرتبة الأولى و (ب) القيمة الدنيا للرتبة الأولى ؟

12 التباعد بين الفتحتين في تجربة الشق المزدوج هو $0.2\ cm$ والمسافة بين الفتحتين والحائل هو $1.2\ m$. والطول الموجي للضوء الساقط على الفتحتين هو $480\ nm$. حدد مواقع أول ثلاث من (أ) القيم العظمى . (ب) القيم الدنيا على جانبي القيمة العظمى المركزية بالنسبة لموضع الهدبة المضيئة المركزية .

13 يسقط ضوء طوله الموجي $460\ nm$ على شقين بينهما مسافة $0.4\ mm$. ما هي المسافة بين الشقين والحائل إذا كان التباعد بين الهدبتين المظلمتين ، الأولى والثانية هو $3.6\ mm$ ؟

14 كم يبلغ التباعد بين الشقين في تجربة الشق المزدوج إذا كانت القيمة العظمى للرتبة الثانية تبعد $6.5\ mm$ عن الهدبة المضيئة المركزية ؟ المسافة من الحائل إلى الشق $2.0\ m$ والطول الموجي للضوء المستخدم $550\ nm$.

■ 15 يسقط ضوء أزرق طوله الموجي $434\ nm$ على الفتحتين في تجربة الشق المزدوج . ويفصل بين القيم العظمى للتداخل $1.00\ mm$ على حائل يبعد $1.0\ m$ عن الفتحتين . كم يبلغ التباعد بين القيم العظمى المتتابعة إذا استخدم ضوء أحمر طوله الموجي $656\ nm$ لإضاءة الفتحتين ؟

■ 16 عند استخدام ضوء الزئبق $(\lambda = 436\ nm)$ في تجربة الشق المزدوج ، فإن القيمة العظمى للرتبة الأولى تحدث عند زاوية مقدارها $4.0 \times 10^{-4}\ rad.$ وعند استبدال مصدر مجهول طوله الموجي بهذا الضوء فإن القيمة العظمى للرتبة الثانية تحدث عند $6.0 \times 10^{-4}\ rad.$. (أ) ما هو الطول الموجي لضوء المصدر الثاني ؟ (ب) وفي أي مناطق الطيف يوجد هذا الضوء ؟

■ 17 يسقط ضوء أبيض يغطي مدى الأطوال الموجية من $400\ nm$ إلى $700\ nm$ على زوج من الفتحات تفصلهما مسافة $0.3\ mm$ ويشاهد التداخل على حائل يبعد $1.8\ m$ عن الفتحتين . أوجد المسافة بين القيم العظمى من الرتبة الأولى للألوان : البنفسجي $(\lambda = 400\ nm)$ و الأحمر $(\lambda = 700\ nm)$.

■ 18 تستخدم في تجربة الشق المزدوج ليونج فتحتان يفصل بينهما $0.30\ mm$ ثم غمر الجهاز بأكمله في الماء . عند أية زوايا تظهر أول قيمتين عظميين للتداخل ، إذا كان الطول الموجي للضوء المستخدم في الفراغ هو $550\ nm$ ؟

القسمان 4-24 و 5-24

19 غطى لوح زجاجي مسطح بطبقة رقيقة من مادة معامل انكسارها 1.3 . كم يبلغ سمك هذه الطبقة إذا كان ضوء طوله الموجي 450 nm ويسقط عموديًا ينفذ بحد أدنى من الانعكاس ؟

20 ما هو سمك الطبقة المذكورة في المسألة رقم 19 إذا كان ضوء طوله الموجي 560 nm يتعرض لأقصى انعكاس ممكن ؟

■ 21 غطى لوح من زجاج كراون بغشاء رقيق سمكه 140 nm . وعندما يسقط ضوء طوله الموجي 530 nm عموديًا على الغشاء فإنه ينفذ تمامًا بحد أدنى من الانعكاس . أوجد معامل انكسار الغشاء . (تلميح : فكر في أي اختلافات الطور تكون ضرورية لجعل $n > 1$) .

22 يسقط ضوء أبيض على لوح زجاجي رقيق سمكه 400 nm ومحاط تمامًا بالهواء . ما هي الأطوال الموجية في الطيف المرئي للضوء الأبيض ، سيكون انعكاسها أقوى ما يمكن عند السقوط القريب من العمودي ؟ اعتبر معامل انكسار الزجاج 1.5 .

■ 23 تعكس فقاعة صابون بقوة كلاً من الضوءين الأحمر ($\lambda = 700$ nm) والأخضر ($\lambda = 500$ nm) إذا سلط عليها ضوء أبيض . فإذا كان معامل انكسار الفقاعة 1.40 ، فما هو سمكها الذي يسمح بحدث هذا الانعكاس ؟

■ 24 انسكبت بقعة من الزيت الشفاف معامل انكسارها 1.26 على سطح المحيط وقد وجد أن الضوء البرتقالي يعاني أقصى انعكاس له عندما يسقط عموديًا على غشاء الزيت . ما هو أدنى سمك لغشاء الزيت ؟ اعتبر معامل انكسار ماء المحيط هو نفس معامل انكسار الماء النقي أي $n = 1.33$.

■ 25 غطيت مرآة معدنية بطبقة رقيقة من البلاستيك (معامل انكساره $n = 1.6$) على سطحها . وقد وجد أن شدة الأشعة المنعكسة تكون عند حدها الأدنى عندما يكون الطول الموجي للضوء 550 nm . أوجد أقل سمكين ممكنين للغشاء . (تلميح : اعتبر أن $n \to \infty$ بالنسبة للمعادن) .

26 تكوّن شريحتان زجاجيتان مسطحتان فيما بينهما إسفينًا هوائيًا رقيقًا للغاية . وعندما ينظر إلى المجموعة في ضوء طوله الموجي 500 nm ، فإن هدبة مظلمة تظهر عند خط اتصال الشريحتين . ما هو سمك الإسفين الهوائي عند (أ) أول هدبة مضيئة و (ب) ثالث هدبة مضيئة ؟

27 عندما ينعكس ضوء أصفر (طوله الموجي 589 nm) من على إسفين هوائي تكون بين شريحتين زجاجيتين مسطحتين فإن التباعد بين هدبتين مضيئتين يكون 0.6 cm . (أ) ما سمك الإسفين الهوائي على بعد 5.0 cm من خط اتصال الشريحتين ؟ اعتبر أن الإسفين يشاهد بواسطة أشعة تسقط عموديًا . (ب) أعد المسألة باعتبار أن الإسفين مملوء بزيت معامل انكساره 1.4 وليس بالهواء .

■ 28 لشريحة زجاجية على هيئة إسفين معامل انكسار مقداره 1.56 . وعندما ينظر إلى الإسفين مباشرة من أعلى بواسطة ضوء طوله الموجي 460 nm فإن حافته المدببة تكون مظلمة . ما هو سمك الإسفين عند الهدبة الرابعة المضيئة ؟

■ 29 تظهر هدبات التداخل على بقعة زيت تطفو فوق بركة ماء . ما هو فرق سمك بقعة الزيت عند هدبتين خضراوين متجاورتين ؟ اعتبر معامل انكسار الزيت 1.4 والطول الموجي للضوء الأخضر 500 nm .

30 يستخدم ضوء الصوديوم الذي طوله الموجي 590 nm لإنتاج حلقات نيوتن . وكان نصف قطر الحلقة العاشرة المظلمة 1.64 cm . (أ) ما مقدار الفجوة الهوائية في هذا الموقع ؟ (ب) وإذا ملئت الفجوة بالماء فما هو مقدار الفجوة في الموضع الجديد للحلقة العاشرة المظلمة ؟ مع العلم بأن النقطة المركزية للنمط مظلمة .

■ 31 يستقر الجانب المحدب لعدسة محدبة مستوية (أي أن أحد جانبيها مستوٍ والآخر محدب) على شريحة مسطحة من الزجاج ، وكان نصف قطر الانحناء لهذا الجانب 4.0 m . ثم سلط ضوء على الوجه الأمامي للعدسة بحيث كان سقوط الأشعة عموديًا ولم يكن الطول الموجي للضوء معروفًا . ووجد أن نصف قطر الحلقة المظلمة رقم 30 هو 5.5 mm كما أن

النقطة المركزية للنمط مظلمة . ما هو الطول الموجى للضوء المتسبب فى هذا النمط ؟

القسم 6–24

32 وجِّه ضوء طوله الموجى 680 nm إلى محزوز به 4000 خط في كل سنتيمتر . ما هـو الانحـراف الـزاوى لـهذا الضـوء فـى حالة (أ) الرتبة الأولى و (ب) الرتبة الثالثة ؟

33 يسلط طالب ضوءً أحمر من ليزر الـهليوم ـ نيون ($\lambda = 632.8$) عبر محزوز حيود لمعايرته . وتحـدث القيمـة العظمـى للرتبـة الأولى عند زاوية مقدارها $19°$. (أ) ما مقدار تباعد المحزوز ؟ عند أية زاوية تظهر القيمة العظمى للرتبة الثالثة ؟

34 الخط الثنائى للضوء الأصفر الصادر من قوس الصوديوم ، مكون من طولين موجيين همـا 588.995 nm و 589.592 nm . احسب التباعد الزاوى بين هذين الخطين فى الطيف من الرتبة الأولى والناتج بواسطة محزوز يحتوى على 5000 خـط فـى السنتيمتر . أعد المسألة بالنسبة لطيف من الرتبة الثانية .

35 لديك محزوز حيود يحتوى على 6000 خط فى السنتيمتر . احسب التباعد الزاوى بين الخط الأزرق (435.8 nm) والخط الأخضر (546.1 nm) للزئبق فى حالة : (أ) طيف الرتبة الأولى و (ب) طيف الرتبة الثانية .

36 احسب الموقع الزاوى لطيف الرتبة الثانية لخط الصوديوم الأصفر (589 nm) النـاتج بواسطة محـزوز حيـود يحتـوى على 5600 خط فى السنتيمتر .

37 وجد أن الخط الأخضر للرتبة الثانية ($\lambda = 546$ nm) يقع عند زاوية $41.0°$ باستعمال محزوز معين . عند أية زاوية سيوجد الخط الأصفر للرتبة الأولى ($\lambda = 589$ nm) .

■ 38 يسقط ضوء طوله الموجى 579 nm عموديًا على محزوز به 5000 خط فى السنتيمتر . كم عدد رتب الحيود المختلفـة التى يمكن رؤيتها للضوء النافذ ؟

■ 39 استُخدم محزوز حيود به 6000 خط فى السنتيمتر داخل خزان كبير للماء . ما هى أصغر ثلاث زوايا (فـى المـاء) يمكـن أن يُرى عندها خط الزئبق الأخضر (546.1 nm) ؟

■ 40 يسقط ضوء أبيض يغطى الأطوال الموجية من 400 إلى 700 nm على محزوز به 4000 خط فى السـنتيمتر . مـا هـو عـرض طيف الرتبة الأولى على حائل يبعد 1.6 m عن المحزوز ؟

القسمان 7–24 و 8–24

41 أوجد العرض الزاوى للقيمة العظمى المركزية (أى الزاوية التى بين القيمتين الصغريين للرتبة الأولى) فى حالة شـق منفـرد عرضه 0.030 cm ويسلط عليه ضوء طوله الموجى 590 nm .

42 سلط ضوء طوله الموجى 436 nm على فتحة منفردة ، فظهرت ، القيمة الدنيا (الصغرى) للرتبة الأولى للحيود عند زاويـة مقدارها $1.8°$ بالنسبة لمركز نمط الحيود . ما هو عرض الفتحة ؟

■ 43 شوهد نمط الحيود الناتج بواسطة ضوء طوله الموجى 589 nm ويمر عبر فتحة ضيقة عرضها 0.2 mm ، على حائل يبعـد 1.0 m عن الفتحة . أوجد عرض القيمة العظمى المركزية كما تشاهد على الحائل .

44 تكون نمط حيود شق منفرد عن طريق إمرار ضوء عبر فتحة ضيقة عرضها 0.060 mm . وكان عرض القيمة العظمى المشـاهد على حائل يبعد 2.0 m عن الفتحة هو 4.25 cm . ما هو الطول الموجى للضوء المستخدم ؟

■ 45 سُمح لأشعة تحت الحمراء طولـها الموجى 12.4 μm بالمرور عبر فتحة ضيقة ويتبين من نمط الحيود المشاهد على حائل يبعد 1.2 m عن الفتحة أن تباعد أول قيمتين صغيرتين للرتبة الأولى على جانبى القيمة العظمى المركزية هو 0.6 mm . كم سيبلغ التباعد الجديد بين القيمتين الصغريين للرتبة الأولى إذا انخفض عرض الفتحة إلى النصف ؟

■ 46 ينظر رجل نحو المصابيح الأمامية لشاحنة بعيدة . فإذا كان قطر إنسان عينه هو 0.24 cm فكم يكون بعد الشاحنة عنه إذا كان المصباحان الأماميان لها قد بدءا في التفرق ؟ اعتبر أن العامل المحدد لهذا هو الحيود الناتج عن إنسان العين . واعتبر أيضاً أن الطول الموجي للضوء 490 nm والمسافة بين المصباحين 1.6 m . ما الذي يمكنك استنتاجه من هذه النتيجة ؟

■ 47 استخدمت عدسة قطرها 3.0 cm لتكوين صورة شريحة فوتوغرافية على شاشة (حائل) تبعد 2.8 m ؛ وقد وضعت العدسة على بعد 10 cm من الشريحة . اعتبر أن العدسة نموذجية أن الحيود هو العامل الوحيد الذي يحد من قدرتها على تكوين الصورة . كان الضوء المستخدم ذا طول موجي 490 nm . ما مدى قرب نقطتين ضئيلتين على الشريحة إذا كان المطلوب تفريقهما على الحائل ؟ وكم يبلغ تباعدهما على الحائل ؟

■ 48 يستخدم تليسكوب « هيل » في مرصد جبل باليمور بكاليفورنيا ، مرآة مقعرة قطرها 5.0 m . ما هي أقل مسافة بين نقطتين على سطح القمر بحيث يمكن تفريقهما (تحليلهما) بهذا التليسكوب ؟ مع العلم بأن المسافة بين الأرض والقمر 3.8×10^8 m . اعتبر أن الطول الموجي للضوء المرصود 500 nm .

القسم 9-24

49 عندما يصطف مستقطبان في خط واحد هو اتجاه استقطابهما ، فإنهما ينفذان ضوءاً شدته I_0 . ما هي النسبة المئوية لهذه الشدة التي سيتم نفاذها لو كان بينهما زاوية مقدارها $50°$ ؟

50 عندما يكون محورا الاستقطاب في مستقطبين متماثلين متجهين باتجاه واحد فإنهما ينفذان ضوءاً شدته I_0 . ما هي الزاوية التي بينهما إذا كانت الشدة النافذة ستصبح $\frac{1}{2} I_0$ ؟

51 وجه مستقطبان بزاوية مقدارها $40°$ فنفذ منهما ضوء شدته I_1 . كم ستكون شدة الضوء النافذ إذا تم توجيه المستقطبين بحيث كان محورا استقطابهما متوازيين ؟

■ 52 يُنفذ مستقطب نموذجي 50 بالمائة من شدة الضوء الساقط عندما يكون هذا الضوء غير مستقطب . ويسقط ضوء غير مستقطب شدته I_0 على مُستقطب نموذجي محور استقطابه رأسي . ثم يمر الضوء النافذ عبر مستقطب ثان محوره يميل بزاوية مقدارها $30°$ مع الخط الرأسي . وفي النهاية ، يمر الضوء عبر مستقطب ثالث اتجاه استقطابه أفقيّ . أوجد شدة الضوء الخارج من المستقطب الثاني والمستقطب الثالث .

53 يسقط ضوء غير مستقطب من الهواء على سطح زجاجي معامل انكساره 1.54 . ما هي زاوية السقوط المناظرة للحد الأقصى من الاستقطاب في الضوء المنعكس ؟

54 ما هي زاوية بروستر بالنسبة للحد الأقصى من الاستقطاب لضوء ينعكس عند السطح البيني للماء والهواء ؟ اعتبر أن الضوء يسقط وهو داخل الماء .

■ 55 اثبت أن زاوية بروستر - بالنسبة لوسط شفاف يحيط به الهواء - بحيث يتوافر الحد الأقصى للاستقطاب بالانعكاس (θ_B) ، ترتبط مع الزاوية الحرجة بالنسبة للانعكاس الداخلي الكلي θ_c بالعلاقة : $\cot \theta_B = \sin \theta_c$.

■ 56 احسب زاوية السقوط عند حدوث أقصى استقطاب بالنسبة لضوء ينعكس من السطح البيني الفاصل بين الماء والزجاج ، باعتبار أن الضوء يسقط من داخل الماء . اعتبر أن معامل الانكسار للزجاج هو 1.52 .

■ 57 تسقط حزمة ضوء بزاوية بروستر على قطعة من مادة بلاستيكية معامل انكسارها 1.62 . ما هي زاوية انكسار الحزمة النافذة ؟

مسائل عامة

■ 58 يتم استقبال موجات الإذاعة اللاسلكية ذات الطول الموجي 200 m ، بواسطة راديو منزلي يقع على بعد 200 km من محطة الإرسال وذلك عن طريقين . أحدهما مسار مباشرة من المحطة والثاني يمر بانعكاس الموجات على شاحنة تقترب من

المستقبل (الراديو) من الناحية المواجهة لجهاز الإرسال ، على امتداد خط مستقيم يصل بين المرسل والمستقبل . ولقد لوحظ تداخلان هدّامان متتابعان للموجات عند المستقبل في فترة زمنية مقدارها 18 s . ما هي سرعة الشاحنة ؟

■ 59 يسقط ضوء طوله الموجي 560 nm مع ضوء طوله الموجي مجهول على فتحتين غير معلوم التباعد بينهما . ويسقط الضوء المناظر للقيمة العظمى للرتبة الرابعة والذي طوله الموجي 560 nm في نفس الموقع تمامًا الذي يسقط فيه الضوء ذو الطول الموجي المجهول والمناظر للقيمة العظمى للرتبة الخامسة . (أ) ما هو الطول الموجي للضوء المجهول في الهواء ؟ (ب) أعد المسألة لو كانت المجموعة كلها في الماء .

■ 60 يسقط ضوء طوله الموجي 620 nm على نظام شق مزدوج مغمور في الماء . وقد تكوّن نمط تداخل على حائل يبعد 2.0 m عن نفس خزان المياه . ما هي المسافة بين القيمة العظمى المركزية إلى القيمة العظمى للرتبة الثانية الظاهرتين على الحائل ، إذا كانت المسافة بين الفتحتين هي 0.5 mm ؟

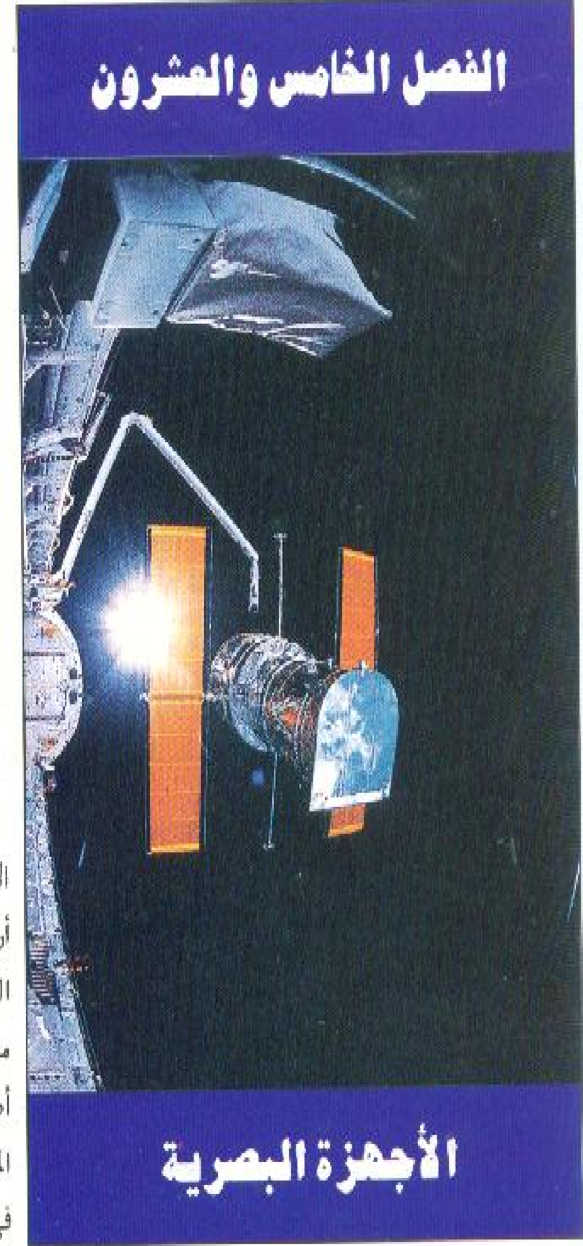
■ 61 لديك شريحتان زجاجيتان متوازيتان ملتصقتان في البداية ويشاهدان من أعلى مباشرة بواسطة ضوء طوله الموجي 590 nm (أصفر) ومنعكس عموديًا على السطحين تقريبًا . وعندما تزاد المسافة بين الشريحتين ببطء فإن الظلام يشاهد عند مسافات تباعد معينة . (أ) ما هي القيم الثلاث الأولى لمسافات التباعد تلك ؟ **تلميح** : يشاهد الإظلام عندما يكون التباعد بين الشريحتين صفرًا . (ب) أعد المسألة بالنسبة للفجوة بين الشريحتين عندما تمتلئ بالماء .

■■ 62 (أ) هل يمكن تصميم محزوز بحيث يتراكب خط طوله الموجي 600 nm من الرتبة الأولى مع خط بنفسجي طوله الموجي 400 nm من الرتبة الثانية ؟ (ب) فإذا كان ذلك ممكنًا ، فكيف ؟ (جـ) وإذا لم يكن ممكنًا ، فهل بالاستطاعة عمل هذا بالنسبة لتوليفات أخرى للرتب ؟ (د) وإذا لم يكن ممكنًا فكيف يتم ذلك ؟

■■ 63 للمظلات المصنوعة من الصلب عادة سطح معدني متعرج ، بحيث تتكرر الانبعاجات كل 10 cm أو نحو ذلك . وعند اختيار الظروف المناسبة فإن هذا النوع من الجدران قد يعمل كمحزوز انعكاس للموجات الصوتية . ما هي قيمة λ للموجات الصوتية الساقطة عموديًا والتي تؤدي إلى قيمة عظمى من الرتبة الأولى عند زاوية مقدارها $41°$ مع العمود ؟

■■ 64 يطفو لوح من البلاستيك الرقيق المعتم على سطح بركة سباحة عمقها 4.0 m ، وكان باللوح فتحة ضيقة عرضها 0.15 mm ثم أسقط ضوء ليزر طوله الموجي 633 nm عموديًا على اللوح . ما هو عرض القيمة العظمى المركزية لنمط الحيود المتكون عند قاع البركة ؟

الفصل الخامس والعشرون



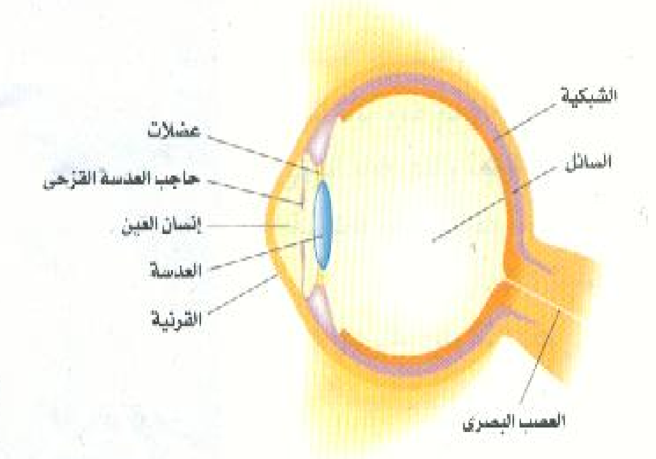
الأجهزة البصرية

الآن وقد فهمنا مبادئ الانعكاس والانكسار والتشتت ، نستطيع أن نناقش كيف تطبق هذه المبادئ فى بعض الأجهزة (النبيطات) البصرية الشائعة . وسوف نتطرق لمناقشة أجهزة تكون صورًا ، مثل العين والميكروسكوب وأجهزة أخرى تستخدم فى قياس أطياف الضوء . ولن نحصل على مزيد من التدريب على حل المسائل فحسب ، ولكننا سنصبح على قدر أفضل من الكفاءة فى استخدام هذه الأجهزة فى تطبيقات شديد التنوع .

25-1 العين

يوضح الشكل 25-1 رسمًا مبسطًا للعين . ولعلك تعلم بالفعل أن قرنية العين هى غطاء واق ، وأن حاجب العدسة القزحي يتحكم فى كمية الضوء الداخل إلى العين أما الشبكية فهى السطح الحساس الذى يحول الصورة المتكونة عليه إلى طاقة كهربية تنقل بعد ذلك إلى المخ . والشعاع الضوئى الداخل إلى العين ينكسر عند القرنية . وتحدث ظواهر انكسارية بدرجة أقل فى إنسان العين وعدستها لأن معاملات انكسار القرنية وإنسان العين والعدسة والأجزاء السائلة فى العين ، كلها متماثلة تقريبًا .

وهذه الظواهر الانكسارية مجتمعة ، تكون صورة للأجسام البعيدة على الشبكية بالنسبة لعين طبيعية مسترخية . ومن ثم فالبعد البؤرى للعين يقارب المسافة بين الشبكية والعدسة مقاسة على المحور الرئيسى للعدسة . ونعلم من رسم مسار الأشعة



شكل 1-25:
رسم توضيحى لعين بشرية .

وأيضًا من معادلة العدسة (المعادلة 2-23) أنه بالنسبة لبعد بؤرى ثابت ، لابد أن يزداد بعد الصورة كلما اقترب الجسم من العدسة . إلا أنه بالنسبة للعين ؛ لابد أن تظل الصورة متكونة على الشبكية ؛ بمعنى أن بعد الصورة لابد أن يظل ثابتًا ويتطلب هذا - بالطبع - أن يكون البعد البؤرى للعين متغيرًا ، وهذه فى الواقع هى الوظيفة الأساسية لعدسة العين . وعلى الرغم من أنها تسهم بقدر يتراوح بين 20 و 25 بالمائة فقط من الانكسار الكلى ، فإن القدرة على تغيير شكل العدسة هو الذى ينتج التغير المطلوب فى البعد البؤرى . وعندما يركز الشخص بصره على جسم قريب فإن **العضلات الهدبية** المتصلة بالعدسة تجعلها أكثر سمكًا وبذلك تصبح العدسة أكبر قدرة على تجميع الأشعة ويصبح بعدها البؤرى أقصر . ويقتصر هذا التعديل بالنسبة للعين العادية على الأجسام التى توضع على حد أدنى للمسافة مقداره نحو 25 cm أمام العين . وهكذا فإن العين العادية قادرة على التركيز على أجسام يتراوح بعدها من **النقطة البعيدة** عند مالانهاية (حيث تكون عضلات العين مسترخية) إلى **النقطة القريبة*** التى تقع على مسافة 25 cm من العين .

صورة مكونة أمام الشبكية
عدسة (مسترخية)
جسم بعيد
النقطة البعيدة لعين مصابة بقصر النظر (الميوبيا)

(أ)

صورة تقديرية تكونت بواسطة عدسة مفرقة
جسم بعيد
النقطة البعيدة لعين مصابة بقصر النظر (الميوبيا)

(ب)

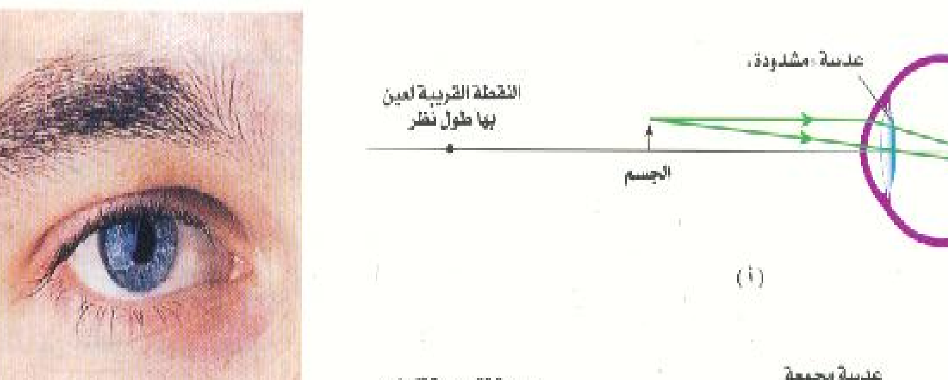
شكل 2-25:
(أ) لا تستطيع عدسة العين المصابة بقصر النظر أن تركز على أجسام فيما وراء نقطة بعيدة معينة .
(ب) ولإصلاح هذا العيب (الميوبيا) تستخدم عدسة تصحيحية مفرقة لكى تكون صورة تقديرية لجسم بعيد عند النقطة البعيدة للعين .

* يمكنك معرفة المسافة الناظرة للنقطة القريبة لعينيك إذا أمسكت بصفحة مكتوبة وأخذت تقربها من عينيك إلى المدى الذى لا تصبح بعده واضحة . وعند هذا الحد تتحدد النقطة القريبة لعينيك .

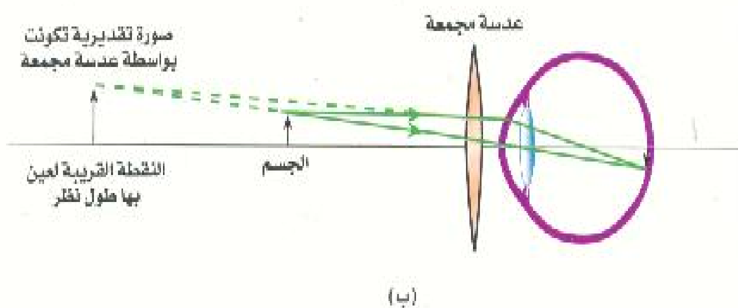
ولا تستطيع العين عند كثير من الناس أن تسترخى بما فيه الكفاية لكى تركز صورة جسم بعيد جدًا على الشبكية ، ويسمى هذا بقصر النظر أو « الميوبيا » . حيث تظل العين مجمعة أكثر من اللازم ، فتكوّن صورة الجسم البعيد أمام الشبكية بشكل ملحوظ كما فى الشكل 2-25 (أ) . والعين المصابة بقصر النظر قادرة على التركيز فقط على أجسام أقرب من نقطة بعيدة معينة محددة . ويتم تصحيح قصر النظر بإضافة عدسة مفرقة أمام العين ، لكى تؤخر تكوين الصورة إلى أن يصل الضوء إلى الشبكية .



تعتبر العين البشرية مثالاً رائعًا على آلة التصوير (الكاميرا) البسيطة . فعدسة العين تركز الضوء فى بؤرة على الشبكية وتضبط القزحية فتحة المدخل حسب الظروف المتغيرة لشدة الضوء .



(أ)



(ب)

شكل 3-25:
(أ) لا تستطيع عدسة عين مصابة بطول النظر (هيبروبيا) أن تركز على أجسام عند مسافات أقل من 25 cm ، وهى النقطة القريبة الطبيعية . (ب) ولتصحيح طول النظر تستخدم عدسة مجمعة تنتج صورة تقديرية عند النقطة القريبة للعين عندما يوضع جسم على مسافة مقدارها 25 cm . ولابد أن يكون البعد البؤرى للعدسة التصحيحية أكبر من 25 cm . لماذا ؟

وهناك وسيلة أخرى لفهم وظيفة العدسة التصحيحية . . وتتضح إذا تذكرنا أن الصورة التى تكونها ستصبح بمثابة جسم لعدسة العين . ولذا يكون على العدسة التصحيحية أن تكوّن صورة تقديرية لجسم بعيد فى مالانهاية عند النقطة البعيدة لعين تعانى من قصر النظر (الميوبيا) والشكل 2-25 (ب) يوضح هذا الموقف .

هناك عيب ثان للإبصار وهو **طول النظر أو (هيبروبيا)** (الشكل 3-25) والعين المصابة بهذا العيب لا يمكنها أن تصبح مجمعة بما يكفى لكى تركز صورة الأجسام الواقعة عند النقطة القريبة الطبيعية . والأشخاص الذين يعانون من طول النظر لديهم نقطة بعيدة طبيعية ولكنهم بحاجة إلى عدسة تصحيحية **مجمعة** حتى تقرب الأجسام إلى مسافة 25 cm . ولابد من اختيار العدسة التصحيحية بحيث لو وضع جسم على بعد 25 cm من العين ، فإنها تكوّن صورة تقديرية عند النقطة القريبة الأكثر بعدا للعين المصابة بطول النظر .

وعندما يتقدم العمر بالبشر فإن عدسة العين عند معظمهم تصبح أقل مرونة ولا تعود العضلات الهدبية قادرة على التحكم فى تحدب العدسة ومن ثم على مقدرتها على تركيز صور الأجسام الموجودة عند النقطة البعيدة الطبيعية أو النقطة القريبة الطبيعية . ويقال عندئذ أن العين قد فقدت **القدرة على التكيف** . ويتيح استعمال نظارات مزدوجة البؤرة على النظر خلال عدسات مفرقة عند التطلع إلى الأمام مباشرة ، وخلال عدسات مجمعة عند النظر إلى أسفل . بل إن بعض الناس يستخدمون ثلاثة أنواع من العدسات مثبتة فى عدسة نظارة واحدة ، تسمى عدسة ثلاثية البؤرة . وتتيح هذه العدسات قدرة طيبة على إبصار أجسام على مسافات بعيدة أو متوسطة أو قريبة .

مثال 25-1

يستطيع رجل مصاب بطول النظر أن يقرأ الجريدة عندما يمسك بها على بعد 75 cm من عينيه فقط . ما هو البعد البؤرى المطلوب لعدسات نظارة القراءة لديه ؟ اعتبر أن المسافة بين النظارة وعينيه مهملة .

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى تمثله مسافة 75 cm ؟

الإجابة : إنها النقطة القريبة لعينيه أى أنه لا يستطيع التركيز على أجسام عند مسافة أقرب .

سؤال : ما الذى على العدسات التصحيحية فعله ؟

الإجابة : على العدسات أن تكوّن صورة تقديرية عند نقطته القريبة أى 75 cm بالنسبة لجسم موضوع على مسافة 25 cm من عينيه . وعندئذ تستطيع عيناه التكيف على التركيز على تلك الصورة .

سؤال : ما علاقة هذه البيانات بالبعد البؤرى لعدسات نظارة القراءة لديه ؟

الإجابة : هذه العلاقة تنظمها معادلة العدسة الرقيقة .

سؤال : ما هو بعد الجسم ؟ وما هو بعد الصورة ؟

الإجابة : طالما أهملنا المسافة بين العدسة التصحيحية والعين ، فإن بعد الجسم وبعد الصورة سيكونان 25 cm و 75 cm على الترتيب . وكل من الموضعين أمام العدسة .

سؤال : ما هى الإشارات الواجب اتخاذها لكل من p و i ؟

الإجابة : الجسم حقيقى ، ولهذا فإن $p = +25\text{ cm}$. والصورة تقديرية ولذلك $i = -75\text{ cm}$.

الحل والمناقشة : تنص معادلة العدسة الرقيقة على ما يلى :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{25\text{ cm}} + \frac{1}{-75\text{ cm}} = \frac{+2}{75\text{ cm}}$$

$$f = +37.5\text{ cm}$$

والبعد البؤرى الموجب هذا يشير إلى عدسة مجمعة . عليك إثبات أنه لو وضعت

العدسات التصحيحية عند 2 cm بالفعل أمام العينين ، فإن البعد البؤرة المطلوب سيكون $f = +33.6$ cm . **تلميح** : في هذه الحالة $p = +23$ cm و $i = -73$ cm .

تمرين : إذا كان البعد البؤرى لعدسات نظارتك $f = 60$ cm . فما هي النقطة القريبة لعينيك . **الإجابة** : 43 cm .

مثال 2-25

ما هو البعد البؤرى المطلوب لعدسة تصحيحية لسيدة نقطتها القريبة تساوى 75 cm ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو نوع عيب الإبصار الذى يصفه هذا المثال وما الذى على العدسات التصحيحية فعله ؟

الإجابة : إن النقطة البعيدة للعين الطبيعية هى مالانهاية . ولكن السيدة لا تستطيع رؤية الأشياء لأبعد من 75 cm . إنها تعانى من قصر نظر (ميوبيا) . وعندما تنظر إلى جسم بعيد فإن العدسات لابد أن تنتج صورة تقديرية لذلك الجسم عند نقطتها البعيدة .

سؤال : ما هى القيم الواجب علىّ اتخاذها لكل من p و i فى معادلة العدسة الرقيقة ؟

الإجابة : $p = +\infty$ و $i = -75$ cm .

الحل والمناقشة :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-75\ \text{cm}} = 0 - \frac{1}{75\ \text{cm}}$$

$$f = -75\ \text{cm} \qquad \text{(عدسة مفرقة)}$$

2-25 آلة التصوير (الكاميرا) البسيطة

تعمل آلة التصوير (فى الشكل 4-25) إلى حد كبير كالعين البشرية . فهى تستخدم عدسة تكون صورة لجسم ما على فيلم فوتوغرافى يقوم مقام الشبكية فى العين ـ بمعنى أن عدسة آلة التصوير تكون صورة حقيقية على الفيلم بنفس الطريقة التى تكون بها عدسة العين صورة حقيقية على الشبكية . وتكون الصورة مقلوبة على الفيلم ويرتبط حجمها I مع حجم الجسم O بالعلاقة المعتادة : $I/O = i/p$.

وخلافًا لما عليه العين فإن عدسة الكاميرا البسيطة ليست ذات بعد بؤرى متغير ولذلك ، وحتى تتكون بؤرة جيدة على الفيلم ، فلابد من تحريك العدسة إلى الخلف وإلى الأمام عند تغيير المسافة بين الكاميرا والجسم .

ويوجد بآلات التصوير غالية الثمن نظامًا معقدًا جدًا للعدسات بدلاً من عدسة واحدة ودرجة التعقيد هذه ضرورية إذا أردنا للكاميرا أن تلتقط صورًا حادة وبسرعات عالية

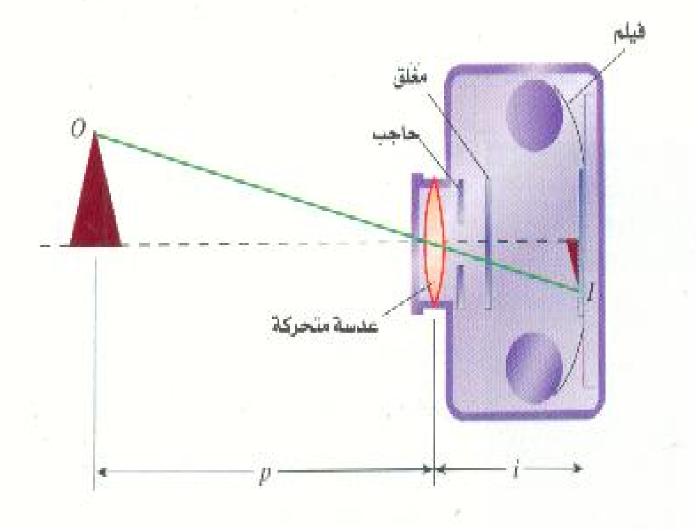


تتيح المنافيخ المرنة التى تثبت عليها كاميرات هذا الإستديو مدى كبيرًا من المسافات بين العدسة والفيلم ؛ وهذا ما يمكّن المصور من وضع العدسة بالقرب من جسم ما حتى يحصل على صور ذات تكبير ضخم . وتملأ الصورة فى هذه الكاميرا الخاصة لوحًا حساسًا مساحته 24 × 20 بوصة مربعة .

للمغلق . ومن الواضح سبب جدوى التقاط صور واضحة حادة ، أما السرعات العالية للمغلق فتتيح التقاط صور واضحة للأجسام المتحركة بسرعة ، فكل حركة للجسم من شأنها هز الصورة بقدر ما ، ولكن كلما قصر الزمن الذى يظل فيه مغلق الكاميرا مفتوحًا كلما انخفض اهتزاز الصورة . وحيث أن المغلق لابد أن يظل مفتوحًا لفترة كافية تسمح بقدر مناسب من الضوء أن يسقط على الفيلم ، فإن سرعات المغلق العالية تستوجب أن تكون العدسة كبيرة لكى تمر كمية كبيرة من الضوء خلال زمن قصير جدًا إلى داخل الكاميرا .

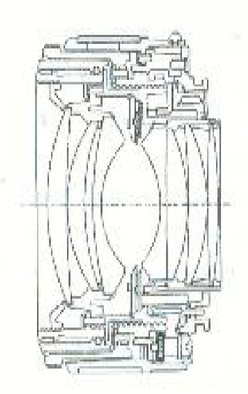
وكما رأينا فى القسم 11–23 فإن الجزء الأوسط من العدسة المكبرة فقط هو الذى يمكن استخدامه إذا كان المطلوب هو صورة واضحة . ويصبح هذا القيد أكثر أهمية إذا كان المطلوب من الكاميرا التقاط صور عن قرب ، لأن العدسة عندئذ لابد وأن تكون محدبة جدًا . ولا يمكن التخلص من أخطاء التركيز فى بؤرة والمصاحبة لعدسة منفردة إلا بعمل مجموعة معقدة من العدسات . وعندئذ يمكن القول بأنه قد تم تصحيح العدسة **لتلافى الزيغ** .

ويتسبب عيب آخر فى العدسات فى جعل أطراف الصور تكتسب ألوانًا مختلفة ويعرف هذا العيب باسم **الزيغ اللونى** . وينشأ هذا العيب من حقيقة أن سرعة الضوء فى الزجاج تختلف باختلاف الطول الموجى ، وعلى ذلك لا يكون معامل انكسار الزجاج هو نفسه لجميع الألوان . فالضوء الأزرق ينكسر بقوة أكبر داخل العدسة عن الضوء الأحمر . وهذا ما يجعل الألوان داخل حزمة ضوء عادى تنفصل عن بعضها . وللتغلب على هذا العيب فإن العدسة تتركب من طبقات مدمجة معًا من نوعين أو أكثر من الزجاج ويطلق



شكل 4–25:
منظر لكاميرا بسيطة . كيف تضبط الصورة فى بؤرة على الفيلم ؟





يتم تصميم عدسة الكاميرا الحديثة ذات الأداء المرتفع عن طريق حسابات معقدة بالكومبيوتر ، وتكون عبارة عن مجموعة من العديد من العدسات .

على العدسة التى تم التخلص جزيئًا من الزيغ الكرى بها **عدسة لالونية** . على أنه من المستحيل تخليص عدسة ما تمامًا من هذا العيب .

مثال 3-25

لديك كاميرا عدستها ذات بعد بؤرى مقداره +55 mm . وعندما يتحرك جسم منطلقًا من مكان بعيد جدًا إلى نقطة على بعد 25 cm أمام العدسة ، فكم ينبغى على العدسة أن تتحرك حتى تحتفظ بالصورة مركزة على الفيلم ؟ وهل ينبغى تحريك العدسة بعيدًا عن الفيلم أم نحوه ؟ (يمكنك اعتبار العدسة رقيقة) .

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يستدل على المسافة التى ينبغى تحريك العدسة لها ؟

الإجابة : إن تلك المسافة هى الفرق بين مسافتى العدسة إلى الفيلم (أى بعدى الصورة) واللازمتين لتكوين صورتين مناظرتين لوضعى الجسم هذين .

سؤال : ما هى المسافة i بين العدسة والفيلم ، المطلوبة لتكوين هاتين الصورتين ؟

الإجابة : عند $p = \infty$ بالنسبة للجسم البعيد ، فإن $1/f = 0 + 1/i$ أو $i = f = 55$ mm . وبالنسبة لجسم على بعد 25 cm .

$$\frac{1}{55\text{ mm}} = \frac{1}{250\text{ mm}} + \frac{1}{i}$$

سؤال : هل هناك سبيل لتوقع ما إذا كانت العدسة سيتم تحريكها نحو الفيلم أم بعيدًا عنه ؟

الإجابة : حيث أن f ثابت ، فإن معادلة العدسة الرقيقة تنص على أنك إذا أنقصت p فلابد أن تزيد i والعكس بالعكس .

الحل والمناقشة : عندما يكون بعد الجسم 25 cm فإن المسافة بين العدسة والفيلم تكون :

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{55\text{ mm}} - \frac{1}{250\text{ mm}}$$

$$i = +70.5\text{ cm}$$

ويبعد هذا $70.5 - 55 = 15.5$ mm عن العدسة عنه بالنسبة للجسم البعيد . أى أنه لابد من تحريك العدسة مسافة 15.5 mm بعيدًا عن الفيلم حتى تتكيف مع الجسم القريب .

3-25 العدسة المكبرة

تعتبر العدسة المكبرة من أبسط الأجهزة البصرية (الشكل 5-25) . إنها مجرد عدسة بجمعة ، وهى أحد أهم الأجزاء فى العديد من الأجهزة البصرية . وتتلخص وظيفتها فى تكوين صورة مكبرة لجسم صغير موضوع قريبًا من العين .

وبإمكاننا فهم كيفية عمل العدسة المكبرة إذا رجعنا إلى الشكل 6-25 ، فحجم

الصورة المتكونة على الشبكية يزداد كلما صار الجسم أقرب فأقرب من العين . على أن العين البشرية غير قادرة على التركيز جيدًا على أجسام أقرب من النقطة القريب ، وإذا وضعنا عدسة مجمعة أمام العين ، كما فى الشكل 7-25 فسنرى الصورة التقديرية التى تكونها . وحتى لو كان الجسم يقع أقرب من النقطة القريبة (أى من القرب بحيث لا يمكن رؤيته بوضوح) فإن الصورة ستتكون عند النقطة القريبة ، فتقوم العين باعتبار الصورة المكبرة على أنها الجسم . وعلى ذلك تكون الصورة التى تكونها عدسة العين على الشبكية هى نفس الصورة التى تنتج عن نسخة مكبرة من الجسم موضوعة عند النقطة القريبة . وهذه الصورة التى على الشبكية أكبر بكثير مما لو كان الجسم الحقيقى الصغيرة يشاهد بالعين المجردة ، ولذلك يتضح الكثير جدًا من التفاصيل .

وتستخدم طريقتان لقياس أثر التكبير فى هذه الحالة . فالتكبير الذى سبق أن عرفناه بالمعادلة 3-23 هو $M = I/O$ وهو ما يعرف **بالتكبير الخطى** ، وقد أثبتنا أنه مكافئ للنسبة $-i/p$ (المعادلة 3-23 (أ)) . ولكى نستعمل العدسة المكبرة فإننا نضع العين وراءها مباشرة ؛ ولنطلق على المسافة بين العدسة والنقطة القريبة للعين p_n . وكما هو واضح فى الشكل 7-25 فإن $i = -p_n$ عندما تكون الصورة التى كونتها العدسة عند النقطة القريبة . وعندئذ يكون لدينا

$$M = \frac{-i}{p} = -i\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{i}\right) = p_n\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{-p_n}\right) = \frac{p_n}{f} + 1 \qquad (25\text{-}1)$$

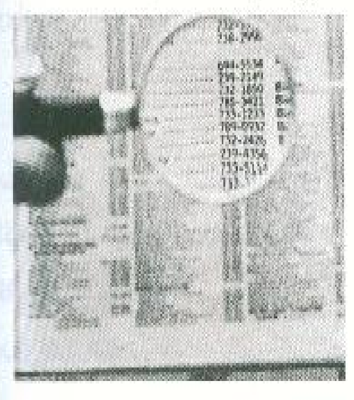
وقد استعنا بمعادلة العدسة للتعويض عن $i/f - 1/i$ بالكمية $1/p$.

وتنطوى الطريقة الثانية لوصف التكبير على استخدام كمية تسمى **التكبير الزاوى** وهو ما ستقوم بتعريفه بالرجوع إلى الشكل 8-25 . فنلاحظ عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة للعين ، كما فى الشكل 8-25 (أ) فإنه يقابل زاوية مقدارها ϕ عند العين . أما إذا وضع على مسافة أقل من بعد النقطة القريبة ثم نُظر إليه عبر العدسة المكبرة فإن الجسم سيقابل زاوية مقدارها ϕ' عند العين . وعندئذ نعرّف :

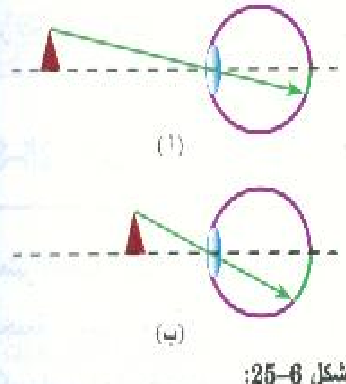
$$\text{التكبير الزاوى} = \frac{\phi'}{\phi} \qquad (25\text{-}2)$$



تستخدم العدسات المكبرة لكثير من الأغراض والأمثلة على ذلك تشمل (رتبت الأشياء باتجاه حركة عقارب الساعة من اليمين إلى أعلى) : عدسة مكبرة للقراءة ، عدسة تستخدم فى عد خيوط الأنسجة ، عدسة الجيولوجى وأخيرًا عدسة مكبرة لفحص الصورة المجسمة .

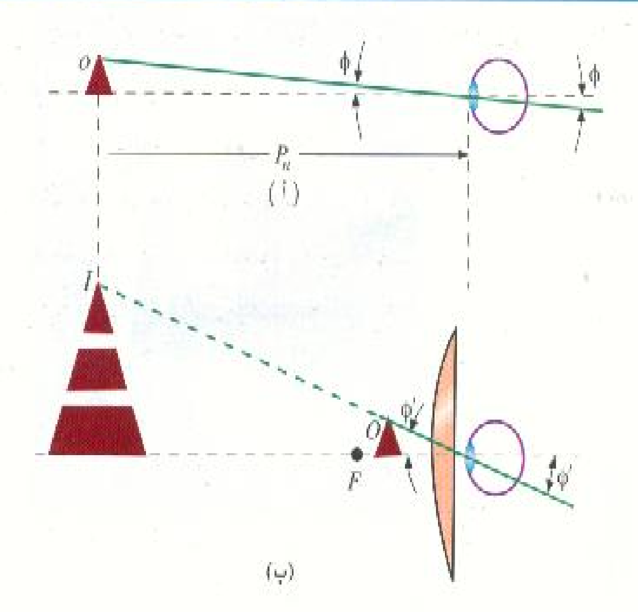


شكل 5-25:
لماذا كان الجزء المكبر فقط هو الذى يقع عند البؤرة بالنسبة للكاميرا التى التقطت هذه الصورة ؟



شكل 6-25:
عند اقتراب جسم من العين ، فإن الصورة التى تتكون على الشبكية تصير أكبر

شكل 7-25:
تتيح العدسة المكبرة للإنسان أن يضع الجسم الذى يراد فحصه عند نقطة أقرب كثيرًا من النقطة القريبة للعين ؛ وهذا من شأنه أن يكبر الصورة المتكونة على الشبكية .



شكل 8-25:
تتركز العين فى كلتا الطريقتين على النقطة القريبة . (أ) عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة فإن الزاوية التى تقابله عند العين (وعلى الشبكية) هى ϕ . (ب) وعندما يقع الجسم على مسافة أقرب من النقطة القريبة للعين فإن زاوية أكبر من ذلك هى التى تقابله($\phi`$) . ولأن الصورة التى كونتها العدسة المكبرة تقع عند النقطة القريبة ، فإن العين تراها بوضوح .

ولكى نحصل على معادلة للتكبير الزاوى فى الحالة الراهنة فإننا نرى بالرجوع إلى الشكل 8-25 أن :

$$\tan \phi = \frac{O}{p_n} \qquad \text{و} \qquad \tan \phi` = \frac{I}{p_n}$$

ولما كانت الزوايا التى تحدث فى مثل هذا المواقف صغيرة ، فإننا نستطيع أن نضع الزوايا نفسها مكان ظلها ، مما يعطى :

$$\text{التكبير الزاوى} = \frac{p_n}{p} = \frac{I}{O} = \frac{I / p_n}{O / p_n} = \frac{\phi`}{\phi}$$

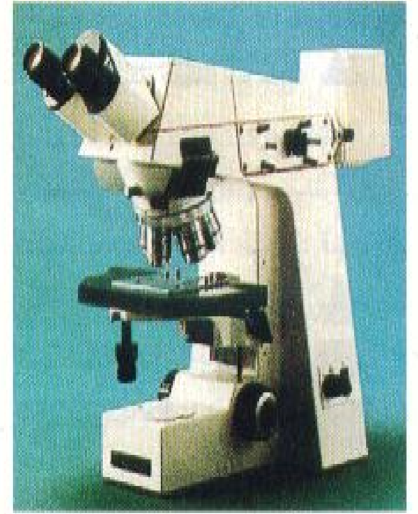
وهى معادلة شبيهة بالمعادلة 25-1 للتكبير الخطى :

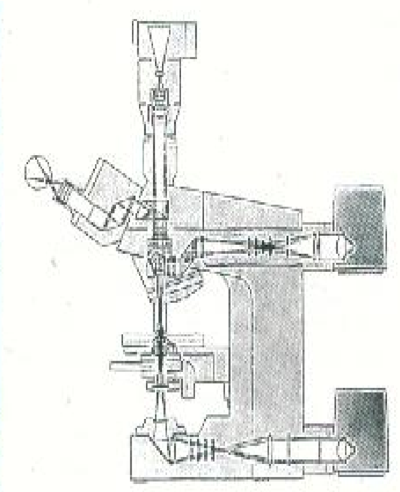
وكما نرى ، فالتعريفان يؤديان إلى نفس النتائج عند الظروف الراهنة . وغالبًا ما ترى الصورة من الناحية العملية عند مالانهاية بالعين المسترخية بدلاً من رؤيتها عند النقطة القريبة p_n ومن ثم $p = f$ ويصبح التكبير ببساطة هو

$$M = \frac{p_n}{f} \qquad \text{(عند رؤية الصورة فى ما لا نهاية)} \qquad (25\text{-}1) \text{ (أ)}$$

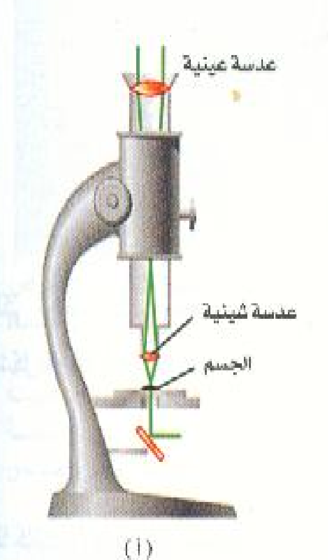
ويعتمد التكبير كما هو واضح على أسلوب استخدام العدسة المكبرة .

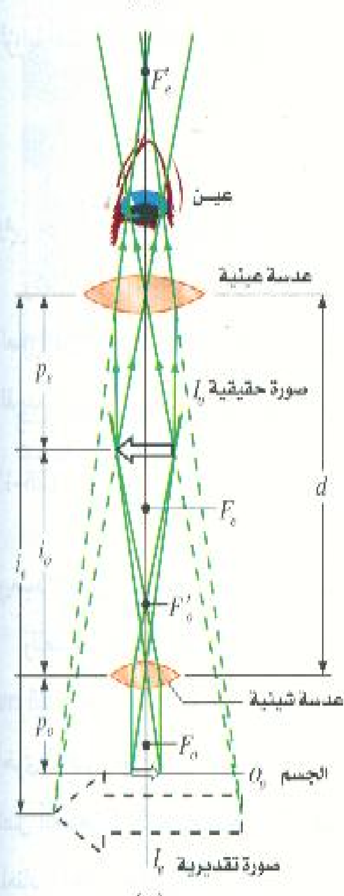
وللعدسة المكبرة النموذجية البسيطة عادة بعد بؤرى قيمته 5 أو 10 cm . وحيث أن $p_n = 25$ cm ، فإن مثل هذه العدسة المكبرة ستوفر تكبيرًا يتراوح بين 2.5 و 5 . وبعبارة أخرى ، فلو بقيت كل العوامل ثابتة ، فإن مثل هذه العدسة ستتيح لنا رؤية تفاصيل تصل أبعادها إلى نحو خمس (1/5) الحجم الذى تراه العين المجردة . على أنه ـ من المعتاد ـ أخذ العوامل الأخرى فى الاعتبار ؛ ومنها تشوش الصورة نتيجة الزيغ الكرى والزيغ اللونى للعدسة . وهناك أيضًا ـ كما رأينا فى القسم السابق ـ إنه حتى مع العدسات التامة النقاء ؛ يحد الحيود من درجة إدراك التفاصيل التى يمكن تحليلها .





ميكروسكوب حديث ذو عدستين عينيتين . ويلاحظ وجود برج دوار يسمح باختيار العدسات الشيئية المناسبة .





شكل 9-25:
تستخدم العدسة العينية فى الميكروسكوب المركب كعدسة مكبرة لرؤية الصورة الحقيقية التى كونتها العدسة الشيئية .

4-25 الميكروسكوب المركب

يؤدى الميكروسكوب المركب إلى تكبير أكبر مما توفره العدسة المكبرة ، نظرًا لأنه يتكون من عدستين تقوم كل منهما بتكبير الجسم (الشكل 9-25) . فالعدسة الأولى وتسمى **الشيئية** تنتج صورة حقيقية مكبرة I_0 للجسم الموضوع بالقرب منها على منصة الميكروسكوب . ولكى يتم هذا ، لابد أن تكون الشيئية مجمعة بقوة وذات بعد بؤرى قصير للغاية f_0 ، وغالبًا ما يبلغ عدة ملليمترات فحسب . أما العدسة الثانية وتسمى **العينية** فهى تعمل عمل عدسة مكبرة . وتقع الصورة I_0 التى تكونها العدسة الشيئية عند نقطة أقرب من f_e . وهو البعد البؤرى للعينية ، وتصبح من ثم هى الجسم بالنسبة للعدسة العينية . وهكذا تتكون صورة تقديرية مكبرة نهائية I_e عند النقطة القريبة للعين .

سنبحث الآن عن معادلة تعبر عن التكبير الخطى للميكروسكوب ، وسنبدأ بالتكبير الخطى للشيئية وسنرمز له بالرمز M_0 . وبدمج تعريف التكبير الخطى مع معادلة العدسة فإن :

$$M_0 = i_0 / p_0 = i_0\left(\frac{1}{f_0} - \frac{1}{i_0}\right) = \frac{i_0}{f_0} - 1$$

أما بالنسبة لتكبير العدسة العينية M_e فيمكننا الاستعانة بالمعادلة 1-25 :

$$M_e = 1 + \frac{p_n}{f_e} = 1 + \frac{i_e}{f_e}$$

حيث p_n لها نفس المعنى السابق وهى أنها النقطة القريبة للعين .

والتكبير الكلى M للميكروسكوب هو حاصل ضرب تكبيرى العدستين . ومن ثم

$$M = M_0 M_e = \left(\frac{i_0}{f_0} - 1\right)\left(1 + \frac{p_n}{f_e}\right) \approx \frac{i_0 p_n}{f_0 f_e} \qquad (25\text{-}3)$$

والتقريب الأخير الذى أجريناه يمكن تبريره عندما يكون البعدان البؤريان صغيرين جـدًا وهـو ما يحدث فى العادة وتـكون i_o عمليًا هـى طول جسم الميكروسكوب تقريبًا ($\approx 18\,cm$) أمـا $p_n = i_e$ وهى نحو $25\,cm$.

وكما نرى فإن f_o و f_e لابد أن يكونا أصغر ما يمكن للحصول على أكبر تكبير ممكن . ولكى يتم هذا دون تشويه خطير نتيجـة صـور الزيـغ المختلفة للعدسـات فـإن مجموعـة مركبة ومصممة بعناية من العدسات لابـد مـن اسـتخدامها بـدلاً مـن العدسـات البسـيطة المبينة فى الشكل 9–25 والمستخدمة كعدسات شيئية وعينية . وعندئذ تكون الأبعاد البؤرية المستخدمة فى المعادلة 3–25 هى الأبعاد البؤرية المكافئة للعدسـات المركبة .

مثال 4-25

البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى ميكروسكوب مركب يبلغ $5\,mm$ ، أما عدسـته العينيـة فبعدها البؤرى $30\,mm$ ، وكانت المسافة بين العدسة الشيئية والعينية $230\,mm$. فإذا كان المطلوب أن تتكون الصورة النهائية عند النقطة القريبة للعين العادية ، فـأين يجـب وضع الجسم ؟ ما هو التكبير الخطى للجسم ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين أوضاع الصورة النهائية والجسم الأصلى ؟

الإجابة : تكوّن العدسة الشيئية صـورة I_o للجسم ، تُتخـذ بعـد ذلـك كجسـم للعدسـة العينية . وتنطبق معادلة العدسة على كل من العدستين .

سؤال : ما هى الكميات المعروفة من كميات معادلة العدسة ؟

الإجابة : بالنسبة للعدسـة الشيئية فإن $f_o = +5\,mm$ أمـا p_n و i_o فـهى غـير معلومـة وبالنسبة للعدسة العينية فإن $f_o = +30\,mm$ و $i_e = -250\,mm$ (لابـد أن تكـون قـادرًا على معرفة السبب فى أن i_e سالب) . وقد أصبـح الآن لديـك مـا يكفـى مـن المعلومـات لإيجاد p_e .

سؤال : إذا علمت قيمة p_e فكيف أربطها بموضع العدسة الشيئية ؟

الإجابة : يمكنك بمراجعة الشكل 9–25 (ب) أن تعرف أن المسافة d بين العدسـتين هـى $d = p_e + i_o$ ؛ وهذا يعطيك قيمة i_o وبدورها تتيح معرفة p_o من معادلة العدسة الشيئية .

سؤال : وهل يكون لدى عندئذ ما يكفى من المعلومات لحساب التكبير الخطى ؟

الإجابة : نعم . فكل المقادير الواردة بالمعادلة 3–25 قـد أصبحت معلومة ، مـع إدراكك بأن $p_n = i_e = 250\,mm$.

الحل والمناقشة : معادلة العدسـة العينية هى :

$$\frac{1}{p_e} = \frac{1}{30\,mm} - \frac{1}{-250\,mm} = \frac{25+3}{750\,mm}$$

ومن ثم $p_e = 26.8\,mm$. وبوضع $d = 230\,mm$ فإن $i_o = 230\,mm - 26.8\,mm$

$i_0 = 203\ \text{mm}$ ، ومعادلة العدسة الشيئية :

$$\frac{1}{p_o} = \frac{1}{5\ \text{mm}} - \frac{1}{203\ \text{mm}} = \frac{203-5}{1015\ \text{mm}}$$

$$p_o = 5.13\ \text{mm}$$

وهذا الموقع عند نقطة أبعد من النقطة البؤرية للعدسة الشيئية . ويكون التكبير هو :

$$M = \frac{i_0 p_n}{f_0 f_e} = \frac{(203\ \text{mm})(250\ \text{mm})}{(5\ \text{mm})(30\ \text{mm})} = 340$$

25-5 التلسكوب الفلكي

الغرض من التليسكوب ـ خلافًا للميكروسكوب ـ هو تكبير الأشياء البعيدة جدًا . وينطبق هذا على التليسكوبات الفلكية حيث تنتشر الأجرام التى ندرسها فى الكون بأكمله . ويحتاج الفلكيون للتليسكوب لتكون لديهم القدرة على ما هو مختلف عن مجرد تكوين صورة مكبرة ولابد للتليسكوب الجيد أن (1) يجمع ما يكفى من الضوء الصادر عن مصادر خافتة ، لتكوين صورة ساطعة و (2) يحلل أكثر ما يمكن من التفاصيل فى الصورة .

وأهم عنصر فى التليسكوب هو العدسة أو المرآة الأولية أو الشيئية التى تجمع الضوء من جسم بعيد تم تكوّن صورة له . وحيث أن المسافة إلى الجسم لانهائية فالصورة تتكون عند مسافة f_0 من العدسة الشيئية .

والتليسكوبات التى تستخدم عدسة شيئية تسمى تليسكوبات **كاسرة** ؛ أما التى تستخدم مرايا منحنية تقوم بدور الشيئية فتسمى تليسكوبات **عاكسة** . ومعروف أن بناء مرايا ضخمة أرخص وأيسر كثيرًا من بناء عدسات ضخمة ، فالمرايا يمكن جعلها خفيفة الوزن ، كما أنها لا تحتاج سوى لسطح مصقول بدقة . ولهذا السبب صارت كل التليسكوبات الحديثة الضخمة تليسكوبات عاكسة . ومن بين أكبر تلك التليسكوبات ذلك المعروف بتليسكوب هيل على جبل بالومار بكاليفورنيا وآخر موجود فى أوكرانيا ولها مرايا شيئية أقطارها على الترتيب 5 m و 6 m . على أن أكبر تليسكوب كاسر هو ذلك الذى يبلغ قطر عدسته 1 m وهو موجود فى مرصد بيركيز فى خليج وليامز بولاية ويسكونسن وقد بنى منذ قرن مضى تقريبًا .

وقد تستخدم التليسكوبات للرؤية المباشرة ، حيث تستخدم عدسة عينية لتكبير ورؤية الصورة التى تكونها الشيئية مثلما يحدث فى الميكروسكوب . على أن الرؤية عادة ما تتم بشكل مباشر فى التليسكوبات الصغيرة فحسب وللاستعمال العابر . أم التليسكوبات المستخدمة فى الأبحاث فهى غالبًا ما تستعمل بدون وجود عدسة عينية ، إذ إنها تعمل بالضبط مثل كاميرات ضخمة ، حيث تقوم العدسات أو المرايا الشيئية بتكوين صورة على لوح فوتوغرافى أو أجهزة إحساس إلكترونية .

دعنا الآن نبحث فى معايير أداء التليسكوبات الفلكية بشىء من التفصيل . وعلى

الرغم من أننا سوف نستعمل رسم مسارات الأشعة في العدسات ، إلا أن كل ما سنحصل عليه من نتائج سيكون صالحاً للتطبيق على التليسكوبات العاكسة أيضاً .

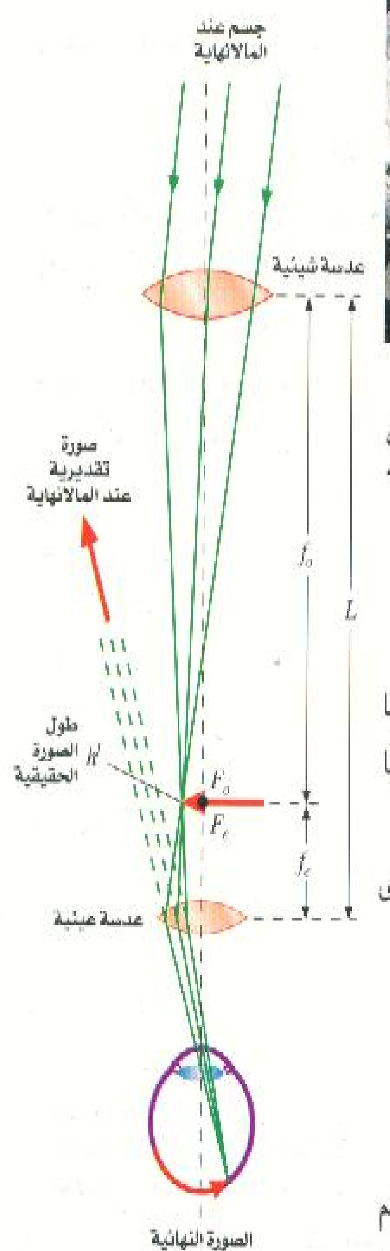
إن حجم أو **مقياس** الصورة التي كونتها الشيئية ؛ يتناسب مع بعدها البؤرى f_0 . ويمكننا - من الشكل 4-25 - أن ترى أنه فى حالة الكاميرا تقابل العدسة نفس الزاوية ϕ بالنسبة لكل من الجسم والصورة . ولذلك يكون حجم الصورة على الفيلم $I = i \tan \phi$. وبالنسبة للمصادر الفلكية فإن $p_0 = \infty$ ، $i_0 = f_0$ و $\tan \phi \approx \phi$ حيث ϕ هى الزاوية المقاسة بالتقدير الدائرى . ومن هذا يمكننا اشتقاق معادلة لحجم الصورة :





(أ)　　　　　　(ب)

(أ) تليسكوب شخصى نموذجى صغير يستخدم فى الرؤية العابرة . (ب) التليسكوب « مايول » الذى يزن 375 طنا وهو مثبت فى مرصد كيت بيك القومى . ويحتفظ بمرآته الشيئية التى يبلغ قطرها 4 m تحت غطاء واق عند قاع الصورة .



شكل 10-25:
تليسكوب فلكى مجهز بعدسة عينية . لاحظ الفرق بين هذا التليسكوب والميكروسكوب المبين فى الشكل 9-25 .

$$I_0 = 0.0175\,\phi \qquad (25\text{-}4)$$

حيث استخدمنا معامل التحويل من قيم ϕ بالتقدير الدائرى إلى قيمها بالدرجات .

وتتناسب درجة **سطوع** الصورة B مع مساحة فتحة الشيئية ، والتى تتناسب بدورها مع مربع قطر الشيئية d ، كما تتناسب B أيضاً مع مربع البعد البؤرى f_0 عكسياً أى أن $B \sim (d / f_0)^2$.

ومعيار الأداء الثالث هو مقدرة التليسكوب على تحليل التفاصيل الدقيقة . وفى النهاية فهى حدود الحيود التى تعطيها المعادلة 7-25 :

$$\sin \theta \approx \theta = \frac{1.22\lambda}{d}$$

وإذا كانت كل من λ و d مقاستين بنفس الوحدات فإن θ ستكون بالتقدير الدائرى .

ونستطيع الآن تلخيص المعايير الثلاثة كما يلى :

1 يعطى البعد البؤرى الطويل للشيئية صورة كبيرة ذات سطوع منخفض نسبياً فإذا لم يكن السطوع مهماً مثلما هو الحال فى التليسكوب الشمسى المخصص لتصوير الشمس فيمكننا تحمل الحصول على صورة كبيرة من غير أن نهتم بمقدرتنا على رؤيتها .

2 تستفيد كل من درجة السطوع ودرجة التحليل (التفريق) من كون قطر الشيئية أو الفتحة كبير . وإذا تم الحصول على تفريق ممتاز فإن حجم الصورة يصبح أمراً ثانوياً وهكذا يكون القطر الكبير للشيئية هو أهم عامل فى تحديد أداء التليسكوب .

ويوضح الشكل 10-25 كيفية استخدام التليسكوب في وجود عينية . فالعدسة الشيئية تكوّن صورة حقيقية لجسم لا نهائي البعد وعلى مسافة f_0 وراء العدسة الشيئية والبعد البؤرى f_0 للشيئية أكبر بكثير من مثيله في الميكروسكوب . كما توضع عدسة عينية تعمل كعدسة مكبرة بحيث تنطبق بؤرتها F_e بالضرورة مع F_0 . ويكون البعد البؤرى f_e للعينية أقصر بكثير من f_0 . ولذلك فإن العينية ستكوّن صورة تقديرية نهائية للجسم عند مالانهاية . وترى العين المسترخية عندئذ الصورة المكبرة .

نستطيع الآن ، اشتقاق معادلة التكبير الزاوى لتليسكوب مجهز بعينية بمساعدة الشكل 11-25 . والزاوية ϕ التى يقابلها الجسم البعيد عند الشيئية هى نفس الزاوية التى تقابلها الصورة I_0 عند الشيئية . وهذه العلاقة تؤدى إلى :

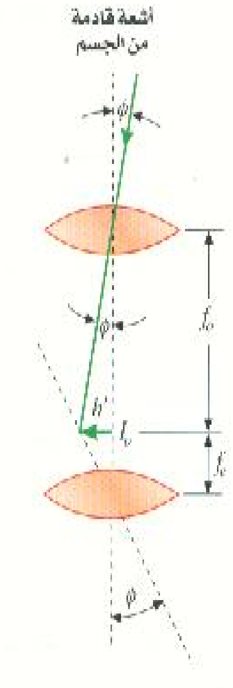
$$\tan \phi \approx \phi = \frac{I_0}{f_e}$$

أما الزاوية المكبرة `ϕ التى تراها العين فتعطى بالمعادلة :

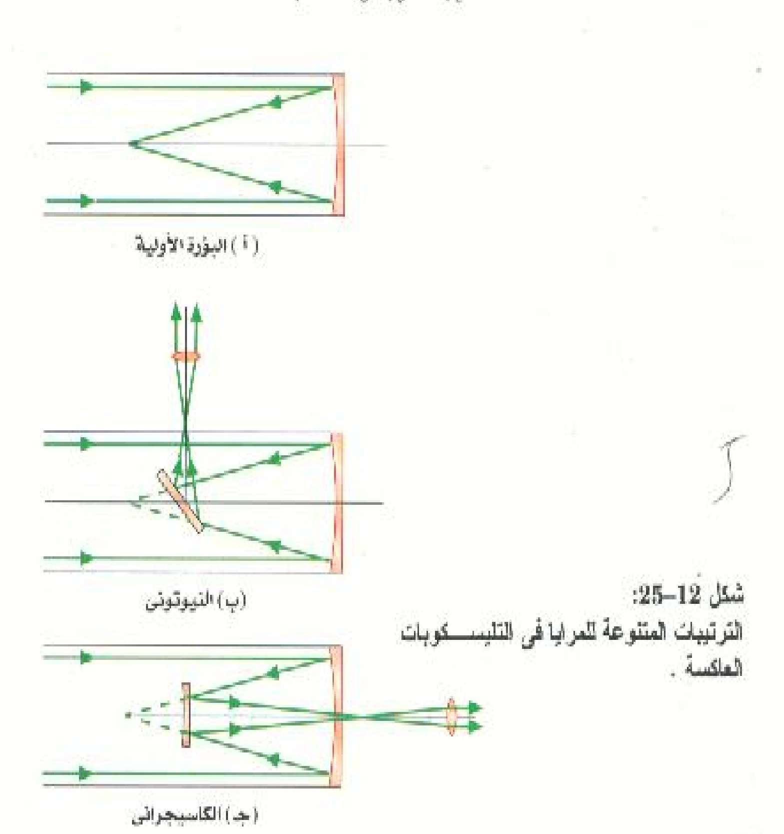
$$\tan \phi` \approx \phi` = \frac{I_0}{f_{e}}$$

والنسبة بين هاتين المعادلتين هى

$$M_\phi = \frac{\phi}{\phi} = \frac{I_0 / f_e}{I_0 / f_0} = \frac{f_0}{f_e} \qquad (25\text{-}5)$$



شكل 11-25: يكبر التليسكوب الزاوية المقابلة للأجسام البعيدة جدا .



شكل 12-25: الترتيبات المتنوعة للمرايا فى التليسكوبات العاكسة .

إذا كانت المرايا تعكس الضوء ليرتد على طول محور التليسكوب ، فقد ابتكر الفلكيون طرقًا عديدة لتوجيه الضوء بواسطة عواكس نحو البقعة المناسبة . ويوضح الشكل 12-25

بعضا من هذه الطرق . ويستوعب أكبر التليسكوبات أجهزة كثيرة بل ويستوعب حتى الفلكي نفسه عند بؤرة العدسة الشيئية تمامًا (وهى المسماة بالبؤرة الأولية) داخل التليسكوب كما في الشكل 25-12 (أ) .

أما البديل الثانى فهو الترتيب **النيوتونى** ، والذى استخدمه لأول مرة إسحق نيوتن ، وهو مناسب للتليسكوبات الأصغر بوجه خاص . ويستخدم فى هذا التصميم (الشكل 25-12 (ب)) مرآة صغيرة مستوية مثبتة قطريًا على محور التليسكوب بحيث تكون أقرب إلى الشيئية منها إلى البؤرة الأولية . وتقطع هذه المرآة الأشعة القادمة من الشيئية قبل وصولها إلى البؤرة الأولية ، ثم تقوم بحرفها عموديًا على محور التليسكوب . ثم تمر الأشعة عبر ثقب صغير لتصل إلى بؤرة كما هو موضح عند جانب التليسكوب . وحيث أن معظم مساحة المرآة الشيئية ، ومن ثم معظم الضوء الذى تجمعه ، يتضمن الأجزاء الخارجية للمرآة ، فإن المرآة الثانوية الموضوعة مركزيًا لن تقطع سوى قليل من الضوء .

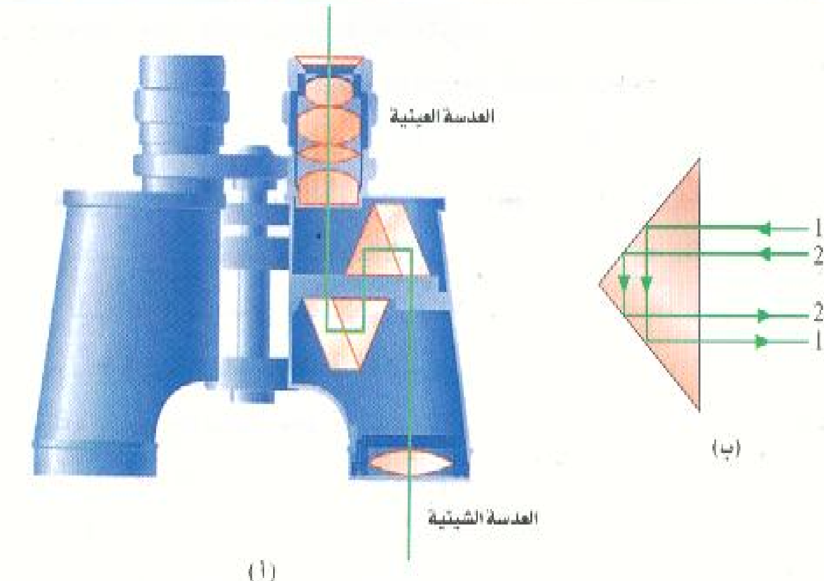
يوضح الشكل 25-12 (جـ) ترتيبًا آخر للمرآة ، يسمى الكاسيجرانى ، حيث توجد به مرآة ثانوية محدبة تعيد توجيه الضوء لينتقل على طول محور التليسكوب حتى ينفذ من ثقب مركزى فى المرآة الشيئية . وتتكون الصورة خلف فتحة الخروج هذه مباشرة وهكذا نرى أن هذا الترتيب يطيل البعد البؤرى للشيئية وذلك « بثنيه » لمسار الضوء ومن شأن هذا أن يقلل من الطول الفيزيائى للتليسكوب مع الاحتفاظ بميزة وجود شيئية ذات بعد بؤرى طويل .

لقد عرفنا أن كلاً من التحليل (التفريق) والقدرة على جمع الضوء يزيدان عند جعل قطر الشيئية كبيرًا جدًا . على أن هذا ـ لو حدث ـ لأصبح الزيغ الكرى خطيرًا لأن كثيرًا من الضوء سينعكس من أجزاء المرآة البعيدة عن المحور . وللقضاء على هذه المشكلة فإن معظم المرايا الشيئية الضخمة تتم صناعتها بمقطع مستعرض على هيئة قطع مكافئ بدلاً من المقطع الكرى . فالأسطح التى على هيئة قطع مكافئ تقوم بتركيز الأشعة المتوازية فى البؤرة بدقة ، حتى لو سقطت تلك الأشعة بعيدًا عن المحور المركزى .

ومع أن **النظارات المعظمة (ذات العينيتين)** لا تستخدم للرصد الفلكى إلا فى الحالات العابرة جدًا إلا أنها عبارة عن تليسكوبين متجاورين (الشكل 25-13) ، مما يتيح للمشاهد أن يرى صورًا مكبرة مع إدراك العمق الذى يوفره استعمال العينين . كما أن المنشورات الموجود بين العدستين الشيئيتين والعدستين العينيتين هى التى تقوم بقلب الصورة من خلال الانعكاس الداخلى الكلى كما هو مبين فى الشكل 25-13 (ب) . ويعادل هذا الانقلاب من التغيرات التى تسببها الشيئية بحيث يتحول الأعلى إلى أسفل واليمين إلى اليسار . ونتيجة لذلك فإن المشاهد يرى صورة مكبرة تحتفظ بنفس اتجاه الجسم الأصلى .

مثال توضيحى 25-1

يقابل البدر زاوية مقدارها $0.5°$ عند راصد على الأرض ، والبعد البؤرى لشيئية فى



شكل 13-25:
النظارة المعظمة (ذات العينيتين) ذات المنشور .

تليسكوب « هيل » على جبل بالومار هو 16.8 m . ما هو قطر صورة البدر عند البؤرة الأولية لهذا التليسكوب ؟ قارن هذه النتيجة مع حجم صورة القمر التي قد تحصل عليها باستعمال آلة تصوير لها عدسة ذات بعد بؤري مقداره 50 mm .

استدلال منطقي : تعطينا المعادلة 4-25 حجم الصورة عند بعد بؤري معين وزاوية مقابلة معينة . وبالنسبة لتليسكوب هيل فإن :

$$I = 0.0175\, f_0\, \phi = 0.0175\,(16.8\text{ m})(0.5^\circ) = 0.147\text{ m}$$

$$= 14.7\text{ cm}$$

وبالنسبة للكاميرا :

$$I = 0.0175(50\text{ mm})(0.5^\circ) = 0.44\text{ mm}$$

أي أن القمر سيبدو كنقطة لا يزيد عرضها عن نصف ملليمتر على الفيلم !





مطياف (إسبكترومتر) ذو منشور . ويرى المنشور على المنصة التي في المركز . يدخل الضوء عبر فتحة الذراع الثابتة الواقعة إلى أعلى يسارًا ، ثم يتفرق عبر المنشور بحيث ترى صورة متعددة للفتحة . واحدة عند كل طول موجي يحتوى عليه مصدر الضوء المستخدم ـ بواسطة تلسكوب صغير مثبت بالذراع التي إلى اليمين . وهي ذراع قابلة للتحريك ، ويمكن قراءة الزاوية المحصورة بينها وبين الذراع الثابتة من خلال العدسة المكبرة الصغيرة (الدائرة السوداء) الموجودة أعلى غلاف المطياف .

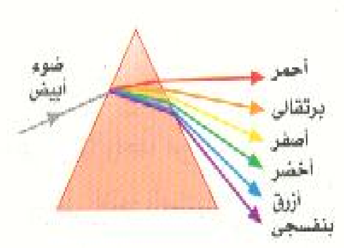
25-6 المطياف (الإسبكترومتر) ذو المنشور

يستعمل المنشور - الذى يصنع عادة من الزجاج فى فصل الضوء إلى الألوان المختلفة . وعادة ما تنحنى حزمة الضوء مرتين إذا مرت من منشور ، مرة عند دخولها والأخرى عند خروجها . ونطلق على الزاوية الكلية التى ينحنى بها الشعاع **زاوية الانحراف** وهى التى يرمز لها بالحرف D فى الشكل 14-25 .

شكل 14-25:
يحرف المنشور حزمة الضوء بزاوية مقدارها D .

ويمكننا حساب الزاوية D باستعمال قانون سنل إذا علمت كل من زاوية السقوط وزوايا المنشور ومعامل انكسار الزجاج . وكلما كان معامل انكسار الزجاج كبيرًا كلما زاد انحراف الحزمة . ولهذا الأمر نتائج مهمة كما سنرى لاحقاً .

لقد ذكرنا فى القسم 9-23 أن سرعة الضوء فى معظم المواد تتغير بتغير الطول الموجى . وهذا يكافئ قولنا أن معامل انكسار المادة يعتمد على لون الضوء . ومعامل انكسار الضوء البنفسجى بالنسبة لكثير من المواد أكبر من نظيره للضوء الأحمر . ويعنى هذا أن الضوء البنفسجى ينحنى بشكل أكبر داخل المنشور عن الضوء الأحمر . ومن ثم ، إذا دخلت حزمة ضوء أبيض فى منشور ، كما فى الشكل 15-25 فإن الضوء يتفرق إلى ألوانه .



شكل 15-25:
ليست زاوية الانحراف بواسطة المنشور ثابتة لجميع الأطوال الموجية التى يحتويها الضوء ولذلك يفرق المنشور الضوء الأبيض إلى الألوان المكونة له .

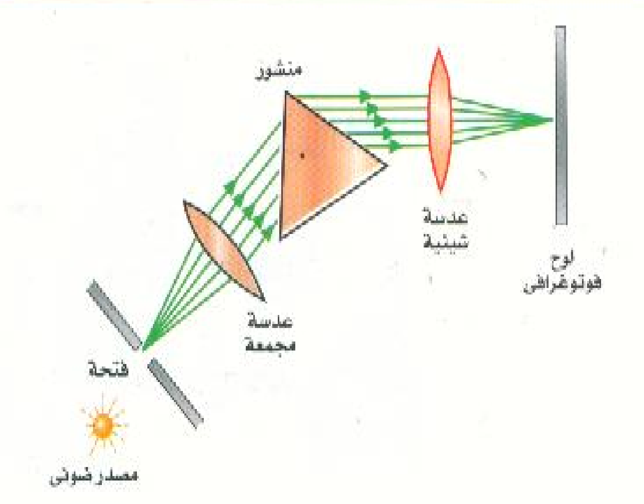
وتسمى مقدرة وسط ما على تفريق الضوء أو تشتيته **بتفريق الوسط** ، وهى كمية تعتمد على المدى الذى يتغير فيه معامل الانكسار مع الطول الموجى . ويتغير التفريق من مادة إلى أخرى كما يوضح الجدول 1-25 . وتتغير هذه الخاصية فى زجاج فلنت ، الذى يعتبر مثالاً على الوسط ذى التفريق المرتفع - بحيث يتغير معامل انكساره بما يزيد قليلا عن 3 بالمائة على امتداد الطيف المرئى .

الجدول 1-25 :

تغير معامل الانكسار مع الطول الموجى (التفريق) بالنسبة للزجاج والكوارتز .

كوارتز منصهر	زجاج فلنت	زجاج كراون	اللون	λ(nm)
———	1.705	1.539	فوق البنفسجى	360
1.467	1.675	1.528	بنفسجى	434
1.463	1.664	1.523	أزرق مخضر	486
1.458	1.650	1.517	أصفر	589
1.456	1.644	1.514	أحمر	656

إن خاصية التفريق لدى المنشورات على قدر كبير من الأهمية فى البحوث العلمية وفى التطبيقات الصناعية . وحيث أن كل ذرة وجزئ يمكن استثارتها لكى تبعث الطول الموجى الخاص بها من الإشعاع الكهرومغناطيسى ، فإن الأطوال الموجية المنبعثة من مادة ما تساعدنا على تحديد هوية المادة . والجهاز الذى يستعمل منشورًا فى تفريق حزمة ضوء إلى الأطوال الموجية التى تكونها ، يسمى مطيافاً (**إسبكترومتر أو إسبكتروسكوب**) والمطياف ذو المنشور البسيط والمرسوم فى الشكل 16-25 هو المستعمل لتحليل الأطوال

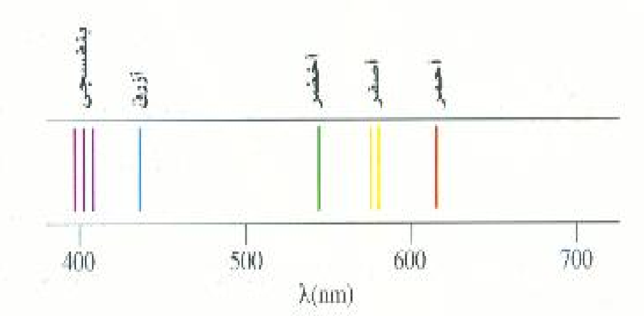


شكل 16–25:
تتكون صورة للفتحة على اللوح الفوتوغرافي للمطياف ذي المنشور . فإذا كان الضوء يحتوي على أكثر من طول موجي واحد ، فإن صورًا عديدة ستظهر على اللوح الفوتوغرافي .

الموجية المنبعثة من مصدر ضوئي . سنفترض الآن أن المصدر يبعث طولاً موجيًا منفردًا . (تبعث مصابيح بخار الصوديوم المستعملة بالطرق والشوارع بضوئها الأصفر المميز ، طولاً موجيًا مرئيًا واحدًا هو 589 nm) .

يدخل الضوء الصادر من المصدر إلى المطياف عبر فتحة ضيقة موضوعة عند النقطة البؤرية للعدسة المجمعة . وحيث أن هذه الفتحة تعمل كجسم موضوع عند هذه النقطة البؤرية فإن الضوء الخارج من العدسة سيكون متوازيًا . وبما أن الطول الموجي ثابت لجميع الأشعة ، لذا فهي تنحرف بنفس الزاوية بواسطة المنشور وتخرج منه جميعها متوازية معًا ، فإذا عبرت العدسة الشيئية فإنها تتجمع في بؤرة تقع على مسافة البعد البؤري لتلك العدسة حيث تتكون صورة للجسم الذي بعثها . وهو في هذه الحالة - الفتحة - إذا ما وضعنا لوحًا فوتوغرافيًا أو فيلمًا عند بؤرة الشيئية ، فإن صورة الفتحة ستظهر على هيئة أحد خطوط الطيف على اللوح أو الفيلم .

يبعث كل نوع من المصادر الضوئية بالأطوال الموجية المميزة له ، ونحن نعرف ما يدور داخل التركيب الذري والجزيئي من دراسة تلك الأطوال الموجية . (الفصل السابع والعشرون) . وعندما يستخدم مصباح بخار الزئبق (المصابيح ذات اللون المائل للزرقة والمستعمل لإضاءة الساحات) . كمصدر الضوء للمطياف ، فإن عدة خطوط طيفية تظهر على اللوح الفوتوغرافي ، كما هو موضح في الشكل 17-25 (أ) ، حيث يمثل كل خط طولاً موجيًا في طيف الضوء المنبعث من ذرات الزئبق . ولكل نوع من ذرات العناصر الكيميائية طيف ينفرد به ذلك العنصر . وتعتبر هذه الأطياف المنفردة بمثابة « بصمات الأصابع » المستخدمة لتحديد كل عنصر . وعلى ذلك ، يكون فحص الأطوال الموجية



شكل 17–25:
عندما يستخدم مطياف في تصوير فتحة مضاءة بواسطة قوس زئبقي ، فإن عدة صور للفتحة (أو خطوط الطيف) ستظهر على الصورة الفوتوغرافية .

ومعرفة أيها موجود فى الطيف الذى يحدثه مصدر مجهول التركيب ، كفيلاً بتحديد العناصر المكونة للمصدر .

مثال توضيحى 2-25

افترض أن حزمة ضوئية فى الهواء قد سقطت بزاوية مقدارها $30°$ بالنسبة للعمود على لوح من زجاج فلنت . ما هى الزاوية المحصورة بين الأشعة المنكسرة ذات الطول الموجى 434 nm وذات الطول الموجى 565 nm ؟ يمكنك الرجوع إلى البيانات الواردة فى الجدول 1-25 .

استدلال منطقى :

يعطينا قانون سنل اتجاه الأشعة المنكسرة :

$$n \sin \theta_r = \sin \theta_i \qquad \text{أو} \qquad \theta_r = \sin^{-1} \frac{\sin \theta_i}{n}$$

وفى كلتا الحالتين ، $\theta_i = 30°$ بحيث أن $\sin \theta_i = 0.500$. بالنسبة للطول الموجى $\lambda = 434$ nm ، فإن $n = 1.675$ مما يؤدى إلى :

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{0.500}{1.675} = 17.37°$$

وبالنسبة للطول الموجى $\lambda = 656$ nm ، فإن $n = 1.644$ مما يعطى :

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{0.500}{1.644} = 17.71°$$

وهكذا ، فإن هذين اللونين يتفرقان عند عبورهما الزجاج بزاوية مقدارها :

$$17.71 - 17.37 = 0.34° \ ■$$

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) قصر النظر (الميوبيا) وطول النظر (هيبروبيا) ، (ب) النقطة القريبة والنقطة البعيدة ، (جـ) الزيغ الكرى ، (د) الزيغ اللونى ، (هـ) التكبير الخطى والزاوى ، (و) قوة التكبير ، (ز) التحليل (التفريق) ، (ح) السطوع ، (ط) مقياس الصورة ؛ (ى) التفرق ؛ (ك) الخط الطبقى .

2 أن ترسم الأجزاء المهمة للعين وأن تشرح وظيفة كل جزء .

3 أن تشرح كيف تقوم العدسات التصحيحية بعلاج قصر النظر وطول النظر . أن تحسب البعد البؤرى لعدسة تصحيحية مطلوبة إذا علمت كلاً من النقطة القريبة أو البعيدة الفعلية لعين مصابة .

4 أن تشرح عمل العدسة المكبرة البسيطة وتحسب تكبيرها .

5 أن تبين كيفية عمل الميكروسكوب المركب عن طريق رسم مواقع عدساته الشيئية والعينية وموقع الجسم . وأن ترسم مسار الشعاع لتحديد موقع الصورة .

6 أن ترسم المنظومة البصرية لتلسكوب فلكي وتحدد موقع الصورة التي يكونها .

7 أن تشرح كيف تكوّن النظارة المعظمة ـ ذات العينيتين ـ صورة لـها نفس اتجاه الجسم .

8 أن تحسب قوة تكبير ميكروسكوب مركب وتليسكوب فلكي ، إذا كان لديك البعد البؤري لكل من الشيئية والعينية .

9 أن تحسب حجم الصورة وحد التفريق في تليسكوب فلكي ، إذا أعطيت البعد البؤري وقطر عدسته الشيئية .

10 أن تشرح كيف يكوّن المطياف ذو المنشور طيفًا خطيًا . وتصف كيف يقوم بفصل الأطـوال الموجيـة ، وكيـف يتـم استخدامه لتحليل حزمة ضوئية .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

النقط القريبة والبعيدة للعين

النقطة القريبة هي أقرب نقطة يمكن وضع الجسم عندها وتقع صورته على الشبكية عندما تكون العين في أقصى حالات التكيـف . وتقع في الحالة الطبيعية عند 25 cm . والنقطة البعيدة هي أبعد نقطة يمكن وضع الجسم عندهـا وتقـع صورتـه علـى الشبكيـة عندما تكون العين في أقصى حالات الاسترخاء . وتقع في الحالة الطبيعية في مالانهاية .

قطر النظر (الميوبيا) وطول النظر (هيبروبيا)

الميوبيا أو قصر النظر هي الحالة التي تكون فيها النقطة البعيدة للعين أقل من مالانهاية والـهيروبيا أو طول النظر هي الحالة التي تكون فيها النقطة القريبة للعين أكبر من 25 cm الطبيعية .

الكاميرا البسيطة

الكاميرا البسيطة نظام يحتوي على عدسة واحدة . وهذه العدسة يمكن تحريكها نحـو المستوى البـؤري أو بعيـدًا عنـه (حيث الفيلم) لكي تتكيف مع المسافات المختلفة للجسم .

العدسة المكبرة البسيطة

العدسة المكبرة البسيطة هي عدسة مجمعة تستخدم لتكوين صورة تقديرية لجسم قريب من العين . وتقع الصورة عادة عند النقطة القريبة أو البعيدة للعين .

الميكروسكوب المركب

يعتبر الميكروسكوب المركب بمثابة منظومة ذات عدستين ، ويستخدم لتكبير أجسام موضوعة قريبًا جـدًا مـن العدسـة الشيئيـة . والعدسة الشيئية عبارة عن عدسة مجمعة ذات بعد بؤري قصير وتقوم بتكوين صورة حقيقية قريبة من العدسة العينية التـي هـي مجرد عدسة مكبرة بسيطة .

التليسكوب الفلكي

يتكون التليسكوب الفلكي من عدسة أو مرآة مجمعة ذات بعد بؤري طويل (تسمى الشيئية) تقوم بتكوين صورة حقيقيـة لجسم بعيدًا جدًا عن بؤرتها .

وعندما يستعمل التليسكوب للرؤية المباشرة فإن عدسة عينية ذات بعد بؤري قصير تستخدم كعدسة مكبرة بسيطة لرؤيـة الصورة التي كونتها الشيئية .

التكبير الزاوى (M_ϕ)

هو النسبة بين الزاوية `ϕ المقابلة للعين من جانب الصورة التى كونها جهاز بصرى ، والزاوية ϕ التى تقابل العين المجردة من جانب الجسم نفسه .

بالنسبة **للكاميرا البسيطة** : $M_\phi = 1$

للعدسة المكبرة البسيطة : $M_\phi = 1 + \frac{p_n}{f}$ (الصورة عند النقطة القريبة)

$M_\phi = \frac{p_n}{f}$ (الصورة عند مالانهاية)

للتليسكوب الفلكي (عند استعمال عينيه) : $M_\phi = \frac{f_0}{f_e}$

التكبير الخطى (M)

هو النسبة بين ارتفاع الصورة النهائية التى يكونها جهاز بصرى إلى ارتفاع الجسم .

بالنسبة : **لعدسة مكبرة بسيطة** : $M = M_\phi$

لميكروسكوب مركب : $M = \frac{i_0 p_n}{f_0 f_e}$

مقياس أو حجم الصورة (I)

مقياس الصورة فى كاميرا أو تلسيكوب هو البعد الخطى I لصورة جسم يقابل زاوية ϕ عند الشيئية .

$$I = 0.0175\, f_0 \phi$$

حيث f_0 هو البعد البؤرى للشيئية و ϕ هى الزاوية المقابلة مقاسة بالدرجات .

سطوع الصورة (B)

يتناسب سطوع صورة كونتها عدسة أو مرآة شيئية مع مربع النسبة بين قطر الشيئية D والبعد البؤرى للشيئية f_0 .

$$B \propto \left(\frac{D}{f_0}\right)^2$$

التفريق أو التحليل الزاوى

هو أقل زاوية يمكن أن يصل إليها التفريق بواسطة عدسة مثالية شيئية ، ويعطى بحد الحيود الذى نوقش فى الفصل الرابع والعشرين . ونعيده هنا مرة أخرى بغرض إكمال الموضوع .

$$\theta_m = 1.22\,\frac{\lambda}{D}$$

حيث D هو قطر الشيئية .

المطياف (أسبكترومتر) ذو المنشور

يستخدم المطياف ذو المنشور ظاهرة التفريق لفصل الضوء إلى أطوال موجية مختلفة . ويتكون من منشور يتغير معامل انكساره مع الطول الموجى (تفريق) ومن عدسات أو مرايا تقوم بتكوين صورة للفتحة عند كل طول موجى منبعث من المصدر الضوئى .

أسئلة وتخمينات

1 درسنا فى الفصل الثالث والعشرين أن للصورة فى المرآة المستوية نفس حجم الجسم . فلماذا إذن نقرب وجوهنا من المرآة عندما نود فحص أعيننا المحتقنة ؟

2 إثبت أن الصورة الحقيقية لسيدة والتي تكونها عدسة مجمعة تكون مقلوبة وإن كانت هي وصورتها لا تزال لهما نفس اليد اليمنى . إثبت أن العكس هو الصحيح بالنسبة للصورة التي تتكون بواسطة مرآة مستوية .

3 تتكون صور أوضح في الأجهزة البصرية عند استعمال جزء صغير فحسب من العدسة . وفي حالة الكاميرا ذات الثقب لا يستعان بأي عدسة . ولكي ترى أن هذا ممكن ، ارسم جسمًا صغيرًا مضيئًا ، ارتفاعه نحو 1 mm ، ويبعد نحو 10 cm من ثقب مقداره 1 cm في حائل معتم كبير . بين كيف ينقص حجم البقعة المضيئة التي يكونها الجسم على حائل يبعد 5 cm وراء الفتحة ، كلما جعلت الفتحة أصغر . إثبت أنه عندما تصير الفتحة ثقبًا صغيرًا كرأس الدبوس ، فإن جسمين يبعدان عن بعضهما مسافة 1 cm وبينهما وبين الثقب 10 cm سيكونان صورتين واضحتين وحادتين على الحائل .

4 بين السبب في أن العدسة إذا وضع أمامها ثقب صغير ، فإنها تكون صورة جيدة حتى إذا لم تكن الصورة في البؤرة تمامًا . (راجع السؤال رقم 3) .

5 يحرف منشور زجاجي حزمة من الضوء الأزرق أكثر نوعًا ما من حزمة من الضوء الأحمر بين باستخدام الجبهات الموجية ، كيف يؤدي هذا بنا إلى استنتاج أن الضوء الأحمر ينتقل بسرعة أكبر عبر الزجاج .

6 أي الأجهزة البصرية التالية يكوّن صورًا حقيقية عند الاستعمال الطبيعي له : (أ) العين ، (ب) الكاميرا ، (جـ) الميكروسكوب ، (د) التليسكوب ، (هـ) النظارة المعظمة (ذات العينيتين) . (و) آلة عرض الشرائح ، (ز) المرآة المستوية ، (ح) مرآة الحلاقة المقعرة ، (ط) مرآة المصباح الكشاف .

7 اشرح بوضوح السبب في أن الخطوط الطيفية تسمى خطوطًا .

8 من الممكن شراء ميكروسكوب رخيص لاستعمال الأطفال . على أن الصورة المتكونة في هذا الميكروسكوب دائمًا ما تكون ذات حواف ملونة . لماذا تحدث هذه الظاهرة ؟

9 افترض أن الكاميرا الصندوقية قد ملئت بالماء وأن العدسة قد جعلت أقوى بحيث ظلت الصورة تتكون على سطح الفيلم . هل ستتغير الصور التي تلتقطها الكاميرا بشكل أو آخر ؟ أعد السؤال بالنسبة لصندوق ذي ثقب صغير وبدون عدسات على الإطلاق .

10 ما هي أهمية سرعة المغلق وسرعة العدسة لآلة تصوير معينة ؟ وما هي اعتبارات التصميم التي تؤثر على هاتين السرعتين ؟

11 إذا كان قطر فتحة العدسة أي قطر الفتحة في كاميرا تجارية هو 5 mm ، فإن زمن التعريض الصحيح لمنظر ما يكون 1/60 s . ما هو زمن التعريض الصحيح بالنسبة لكاميرا ذات ثقب تستخدم نفس نوع الفيلم ، إذا كان قطر الثقب هو 0.50 mm ؟

12 لديك أنبوبة طويلة من الورق المقوى كالتي تستعمل في إرسال الأوراق بالبريد ولديك عدستان ، بعداهما البؤريين هما 60 cm و 10 cm على الترتيب ويمكن تركيبهما في الأنبوبة الأسطوانية المذكورة . كيف تستخدم هذه الأشياء لتصنع تليسكوبًا للأطفال . ما هو تكبير هذا التليسكوب عند استخدامه لرؤية أجسام بعيدة ؟ وكيف تثبت هاتين العدستين بالأنبوبة لكي تعملا كميكروسكوب ؟ قيم أداء هذا الميكروسكوب .

مسائل

القسم 1-25 (فيما يلي ، يمكنك إهمال المسافة بين العين والعدسة التصحيحية)

1 تبعد شجرة ارتفاعها 4.0 m عن شخص ما 16 m . ما هو ارتفاع الصورة على شبكية ذلك الشخص ؟ اعتبر أن عدسة العين تبعد عن الشبكية 1.5 cm .

2 إذا كان ارتفاع صورة جسم على شبكية شخص 0.54 mm عندما يكون الجسم عند النقطة القريبة للعين (25 cm) ، فما يكون الارتفاع إذا كان الجسم على بعد 4.0 m ؟

3 النقطة البعيدة لشخص عينه مصابة بطول النظر هو 90 cm . والأجسام الأقرب من 90 cm لا يمكن أن ترى بوضوح . وتستخدم عدسة مجمعة لتصحيح رؤية كتاب موضوع على بعد 25 cm من العين . ما هو البعد البؤري لتلك العدسة ؟

4 يستطيع طالب مصاب بقصر النظر أن يرى ما كتب على السبورة في الفصل بوضوح فقط عندما يجلس على مسافة أقل من 1.6 m من السبورة . ما البعد البؤرى لنظارات الطالب الواجب توفره حتى يرى الطالب الأجسام البعيدة بوضوح ؟

5 يرتدى شخص ما نظارة بعدها البؤرى ‎-80 cm‎ . أين تقع النقطة البعيدة لذلك الشخص ؟

6 ورد فى كشف نظارة شخص ما أن $f = +60$ cm . ما هو نوع العيب فى عين الشخص .

7 تغير كشف النظارة الطبية لطالب من $f = -120$ cm إلى $f = -90$ cm خلال عام واحد . ما هو مقدار التغير فى النقطة القريبة لعين ذلك الطالب ؟

■ 8 يرتدى طفل نظارة ذات عدسات سميكة من نوع العدسات المكبرة . أما أخوه الأكبر فيمسك بالنظارة فى ضوء الشمس ويحصل على صور للشمس حيث تعطى كل عدسة صورة للشمس على بعد 42 cm من العدسة . ما هى النقطة البعيدة المحتملة لعين الطفل وكذا النقطة القريبة بدون استعمال النظارة ؟

■ 9 يرتدى شخص يعانى من طول النظر نظارة بعدها البؤرى $f = +35$ cm . وكانت النقطة القريبة لذلك الشخص بدون النظارة 60 cm . ما هى النقطة القريبة المصححة لذلك الشخص ؟

القسم 2–25

10 يستخدم فى كاميرا بسيطة عدسة منفردة بعدها البؤرى 10 cm ، وكان حجم الصورة التى تتكون على الفيلم 35 mm . ما المسافة التى يوجد عندها جسم طوله 3 m بالنسبة للكاميرا إذا أريد للصورة أن تتكون فى حيز الفيلم ؟

11 المسافة من العدسة إلى الفيلم فى كاميرا ذات عدسة واحدة هى 6 cm ، وتلتقط الكاميرا صورًا حجمها 6 cm × 4 cm . ما هو بعد الكاميرا عن لوحة حجمها 80 cm × 80 cm الواجب وضعها عنده حتى تنضبط صورة اللوحة على حيز الفيلم ؟

12 عندما تستخدم الكاميرا الواردة فى المسألة رقم 11 لتصوير برج يقع على مسافة 20 cm ، فإن الصورة التى تتكون على الفيلم يكون ارتفاعها 1.8 cm . ما هو ارتفاع البرج ؟

■ 13 تقوم كاميرا ذات عدسة واحدة بتكوين صورة واضحة لجسم بعيد عند ما تكون العدسة على مسافة 7 cm من الفيلم . (أ) ما هو البعد البؤرى للعدسة ؟ (ب) ما المسافة التى يجب تحريك العدسة بها للحصول على أفضل تركيز فى البؤرة لجسم يبعد 3 m ؟

■ 14 يستخدم فى كاميرا صندوقية ذات عدسة ثابتة ، عدسة بعدها البؤرى 25 cm ولوح فوتوغرافى يبعد 25 cm عن العدسة . وقد التقطت صورة لجسم يبعد 4 m عن الكاميرا . كم تبعد الصورة التى تكونت عن اللوح الفوتوغرافى ؟

■ 15 تقوم كاميرا قطر فتحتها (فتحة العدسة بها) 50 mm بالتقاط صورة لجسم بشكل مضبوط عندما يكون زمن التعريض 1/50 s . فإذا قل قطر الفتحة إلى 35 mm فكم يكون زمن التعريض اللازم لالتقاط صورة بنفس الجودة ؟

القسم 3–25

16 استعملت عدسة بعدها البؤرى 6 cm كعدسة مكبرة . (أ) أين يجب وضع الجسم للحصول على أكبر قيمة للتكبير ؟ (ب) وما قيمة ذلك التكبير ؟

17 تكبر عدسة مكبرة صورة جسم ما بتكبير زاوى مقداره 5 . ما هو البعد البؤرى للعدسة تقريبًا ؟

18 يستخدم شخص نقطته القريبة 20 cm عدسة مكبرة بعدها البؤرى 6 cm . ما هو التكبير الذى يحصل عليه عند (أ) نقطته القريبة ، (ب) مالانهاية ؟

■ 19 تستطيع طالبة نقطتها القريبة 25 cm أن ترى بعوضة طولها 0.3 mm بعينها المجردة . ثم تستخدم عدسة مكبرة بعدها البؤرى 8 cm لرؤية نفس البعوضة . ما هى النسبة بالتقريب بين حجمى الصورتين على الشبكية ؟

20 تستعمل عدسة مكبرة بعدها البؤرى 7.0 cm بواسطة طالب قصير النظر بحيث تتكون الصورة النهائية عند النقطة القريبة له وهى 15 cm . ما التكبير الذى حصل عليه الطالب ؟

■ 21 يستخدم أحد هواة جمع الطوابع عدسة مكبرة ذات تكبير زاوى مقداره 8 حيث يضع الطابع على مسافة 5 cm من العدسة . (أ) أين تتكون صورة الطابع ؟ (ب) وهل هى تقديرية أم حقيقية ؟

القسم 4–25

22 ما هو التكبير التقريبى لميكروسكوب عدسته الشيئية ذات بعد بؤرى مقداره 3 cm والبعد البؤرى لعينيته 9 cm ؟ اعتبر أن المسافة بين العدستين 18 cm .

23 تحدث شيئية ميكروسكوب بمفردها تكبيرًا مقداره 20 . ما هو البعد البؤرى المطلوب فى العينية حتى يكون التكبير الكلى 2000 ؟ اعتبر أن الصورة النهائية تتكون على بعد 25 cm من العين وأن المسافة بين العدستين هى 18 cm .

24 يراد أن يكون التكبير فى ميكروسكوب ما 900 . ولهذا الميكروسكوب أنبوبة طولها 18 cm وتستخدم عدسة شيئية بعدها البؤرى 0.90 cm . أوجد البعد البؤرى للعدسة العينية المطلوبة .

25 يبلغ طول أنبوبة ميكروسكوب 18 cm ويستخدم الميكروسكوب عدسة عينية بعدها البؤرى 4.0 cm وعدسة شيئية بعدها البؤرى 1.0 cm . ما هو التكبير التقريبى للميكروسكوب ؟

■ 26 يبلغ تكبير العدسة الشيئية لميكروسكوب مركب 40 وطول أنبوبته 20 cm . ويستخدم فى الميكروسكوب عينية تكبيرها 16 . ما هو البعد البؤرى لكل من (أ) العينية ؟ و (ب) الشيئية ؟ (جـ) ما هو التكبير الكلى للميكروسكوب ؟

■ 27 قام طالب بصناعة ميكروسكوب بأن ثبت عدسة بعدها البؤرى 6.0 cm إلى أحد طرفى أنبوبة طولها 18 cm وعدسة بعدها البؤرى 3.0 cm عند الطرف الآخر . (أ) أين بالتقريب عليه أن يضع العينة المراد فحصها أمام الشيئية ؟ (ب) ما هو التكبير التقريبى لهذا الميكروسكوب ؟

■ 28 تتكون الصورة الأولى لحشرة فى ميكروسكوب معملى على مسافة 16 cm من العدسة الشيئية . وكانت الحشرة على مسافة 4.00 mm من الشيئية عندما كانت صورتها فى البؤرة . أوجد البعد البؤرى للعدسة الشيئية .

القسم 5–25

29 يستخدم تليسكوب فلكى لرؤية القمر وهو مجهز بعدسة شيئية بعدها البؤرى 60 cm وعدسة عينية بعدها البؤرى 3.0 cm . ما هو التكبير الزاوى للقمر باستعمال هذا التليسكوب ؟

30 لتليسكوب فلكى عدسة شيئية قطرها 15 cm وبعدها البؤرى 75 cm . ما هو تكبير التليسكوب إذا كان يستخدم مع عدسة عينية بعدها البؤرى 2.5 cm ؟

31 يستخدم تليسكوب عدسة عينية تكبيرها 5 ، والمسافة بين العينية والشيئية 55 cm . ما هو التكبير الإجمالى للتليسكوب ؟

32 البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى تليسكوب فى أحد المراصد هو 16 m . وعندما يستعمل هذا التليسكوب لرصد القمر ، فما هى المسافة على سطح القمر التى تناظر 1 cm على الصورة التى تكونها العدسة الشيئية ؟ (المسافة بين الأرض والقمر هى 3.8×10^8 m) .

■ 33 ما هى قوة تكبير تليسكوب يستخدم عدسة شيئية بعدها البؤرى 100 cm وعينية قوة تكبيرها 6 ؟

■ 34 المسافة بين العدسة الشيئية والعينية فى تليسكوب معين تبلغ 100 cm والتكبير الزاوى للتليسكوب 70 . أوجد البعدين البؤريين للعدستين .

■ 35 افترض أنك تنظر إلى مبنى ارتفاعه 18 m ويبعد عنك مسافة 600 m من خلال تليسكوب قوة تكبيره الإجمالية 12 . ما هى الزاوية التى تقابل المبنى عند عينيك مقدرة بالتقدير الدائرى ؟

36 تليسكوب عاكس يستعمل مرآة شيئية بعدها البؤرى 80 cm . (أ) ما هو حجم صورة القمر التى تكونها هذه المرآة ؟ ، (ب) وإذا استعملت عدسة عينية بهذا التليسكوب وبعدها البؤرى 5.0 cm فكم تكون قوة تكبير هذا التليسكوب ؟ (اعتبر المسافة إلى القمر 3.8×10^8 m وقطر القمر 3.5×10^6 m) .

37 يحتاج تليسكوب عدسته الشيئية لها قطر مقداره 20 cm إلى 2.5 min. من زمن التعريض لكى يلتقط صورة واضحة لنجم بعيد . كم يبلغ زمن التعريض المناسب إذا كان قطر العدسة الشيئية للتليسكوب 25 cm ؟

38 يستخدم تليسكوب كاسر عدسة شيئية بعدها البؤرى 1.8 m وعدسة عينية بعدها البؤرى +10 cm . وإذا نظرت إلى برج بعيد خلال هذا التليسكوب ، فبكم مرة سيبدو البرج أكبر ؟

القسم 25-6

39 تسقط حزمة ضوء مكونة من طولين موجيين فقط هما $\lambda_1 = 434$ nm (بنفسجى) و $\lambda_2 = 589$ nm (أصفر) بزاوية مقدارها 40° على شريحة مستوية من زجاج فلنت . أوجد الزاوية المحصورة بين الحزمتين داخل الشريحة الزجاجية . معامل انكسار زجاج فلنت هو 1.528 للبنفسجى و 1.517 للأصفر .

40 تسقط حزمة ضوئية من مصدر يبعث بثلاثة أطوال موجية هى 434 nm و 656 nm و 768 nm بزاوية مقدارها 60° على سطح شريحة مستوية من زجاج كراون ، الذى تبلغ معاملات انكساره 1.546 و 1.520 و 1.517 على الترتيب للأطوال الموجية الثلاثة . احسب التباعد الزاوى بين كل اثنين من الحزم المتجاورة داخل الشريحة الزجاجية .

■ 41 تتعلق هذه المسألة بالقسم 25-6 والشكل 25-14 . وكلما تغيرت زاوية سقوط الضوء على الوجه الأمامى للمنشور ، فإن زاوية الانحراف D هى الأخرى تتغير . ويمكن إثبات أن الزاوية D تكون عند حدها الأدنى عندما يكون شعاع الضوء داخل المنشور موازيًا لقاعدة المنشور . ويتيح لنا قياس زاوية الانحراف الصغرى D_{min} ، إيجاد معامل انكسار مادة المنشور . اثبت أن معامل انكسار المنشور يعطى بالمعادلة :

$$n = \frac{\sin[\frac{1}{2}(A + D_{\min})]}{\sin(A/2)}$$

حيث A زاوية رأس المنشور .

■ 42 يبلغ معامل انكسار زجاج معين 1.4650 بالنسبة للطول الموجى $\lambda = 440$ nm و 1.4570 عندما $\lambda = 580$ nm . احسب زاوية الانحراف الصغرى لكل من هذين الطولين عندما يسقطان على منشور مصنوع من هذا الزجاج وزاوية رأسه 60° .
تلميح : استخدم نتيجة المسألة 41 .

■ 43 إثبت أنه عندما يكون المنشور رقيقًا جدًا وزاوية رأسه A صغيرة جدًا فإن زاوية الانحراف D تعطى بالمعادلة $D = A(n - 1)$ عندما تكون زوايا السقوط صغيرة .

■ 44 تسقط حزمة ضوئية بزاوية مقدارها 48° على وجه منشور زاوية رأسه 60° ومعامل انكسار مادة المنشور لهذا الضوء هو 1.590 . أوجد (أ) الزاوية التى تغادر بها الحزمة المنشور و (ب) زاوية انحراف هذه الحزمة D .

■ 45 يسقط ضوء أصفر طوله الموجى 589 nm على وجه منشور من الكوارتز المنصهر بزاوية سقوط مقدارها 72° . وزاوية رأس المنشور مقدارها 60° ومعامل انكسار مادته للضوء الأصفر هو 1.458 . أوجد (أ) زاوية الانكسار عند الوجه الأول ، (ب) زاوية السقوط على الوجه الثانى ، (جـ) زاوية الانكسار عند الوجه الثانى و (د) زاوية الانحراف بين الشعاعين الساقط والخارج .

مسائل عامة

■ 46 إثبت أن طول صورة جسم ما على الشبكية يتناسب عكسيًا مع بعد الجسم عن العين .

■ 47 لاحظ مدرس أن طفلاً فى فصله يمسك بالصفحات على بعد 15 cm من عينيه عند القراءة . (أ) هل الطفل مصاب بقصر النظر أم بطول النظر ؟ (ب) ما هو نوع العدسة الواجب استعمالها لتصحيح نظر الطفل ، وكم يجب أن يكون بعدها البؤرى ؟

■■ 48 يحاول مخبر خاص نقطته القريبة 16 cm أن يستخدم عدسة مفرقة كعدسة مكبرة . (أ) كم يجب أن يكون البعد البؤرى للعدسة حتى يمكن للمخبر أن يرى صورة واضحة ؟ (ب) إذا كان البعد البؤرى للعدسة $f = -50$ cm . فما هو أقصى تكبير يمكن الحصول عليه ؟

■■ 49 استُخدم ميكروسكوب لرؤية علامتين البعد بينهما 0.0300 mm . ما هى الزاوية التى يقابلانها (مقاسة بالدرجات) عند العين عندما تشاهدان عبر ميكروسكوب قوة تكبيره 360 ؟

■■ 50 يستخدم ميكروسكوب قياسى (طول أنبوبته 18 cm) عدسة شيئية تحدث تكبيرًا مقداره 20 وعدسة عينية تكبيرها 5 . افترض أن الشيئية ×20 والعينية ×5 وضعتا فى ميكروسكوب طول أنبوبته 18.75 cm . احسب النسبة بين التكبير الإجمالى للوضع الأخير وتكبير الميكروسكوب القياسى .

■■ 51 تغير قطر الشيئية فى تليسكوب ما من 0.80 cm إلى 4.0 cm . (أ) ما هى نسبة زيادة شدة الضوء فى التليسكوب لو أن كل الأبعاد الأخرى ظلت ثابتة ؟ (ب) ما هى نسبة تغير شدة الضوء إذا ضوعف أيضًا البعد البؤرى للعدسة الشيئية فى نفس الوقت مع زيادة القطر ؟

■■ 52 لدى أحد الطلاب عدستان زجاجيتان بعداهما البؤريان هما +100 cm و +36 cm ، ويرغب فى وضعهما داخل أنبوبة أسطوانية من الورق المقوى لكى يصنع تليسكوبًا يكون أقصر ما يكون من حيث الطول ولديه مع ذلك أكبر تكبير زاوى ممكن . (أ) ما هى المسافة بالتقريب بين العدستين ؟ (ب) كم سيكون تكبير التلسكوب تقريبًا ؟

■■ 53 لقد علمنا فى القسم 5-25 أن التليسكوب الفلكى يكوّن صورًا مقلوبة وقد يكون هذا مثار إعتراض إذا أراد الشخص أن يشاهد أوبرا من مقعد بعيد فى دار الأوبرا . وكبديل عن هذا يمكن للإنسان أن يستعمل نظارة أوبرا تسمى تليسكوب جاليليو . واحد أمثلة تليسكوبات جاليليو تستخدم فيه عدسة شيئية بعدها البؤرى +40 cm وعدسة عينية بعدها البؤرى −20 cm وتوضع على مسافة 10 cm من العدسة الشيئية . حدد موقع الصورة النهائية لجسم بعيد والتى تكونت بهذه المجموعة من العدسات . هل الصورة حقيقية أم تقديرية ؟ معتدلة أم مقلوبة ؟ وما هو التكبير الإجمالى لهذا التليسكوب ؟

■■ 54 لديك نوع معين من الزجاج معامل انكساره 1.650 للضوء الأزرق ذى الطول الموجى 430 nm ، ومعامل انكساره 1.615 للضوء الأحمر ذى الطول الموجى 680 nm . وتسقط حزمة ضوئية تحتوى على الطولين الموجيين المذكورين بزاوية سقوط مقدارها 70° على أحد أوجه منشور مصنوع من هذا الزجاج . وكانت زاوية رأس المنشور تساوى 60° . أوجد التباعد الزاوى $D_b - D_r$ (وهو ما يسمى أيضًا التفريق) للطولين الموجيين عندما يخرجان من الوجه المقابل للمنشور .

الجزء الخامس

الفيزياء الحديثة

« إننى أفكر وأفكر لشهور وسنوات ثم أخرج فى تسع وتسعين مرة بنتيجة خاطئة. وفى المرة المائة أكون مصيباً »

ألبرت أينشتين

عندما أوشك القرن التاسع عشر على الرحيل ، شعر كثير من المراقبين أن الفيزياء قد اكتملت تقريبًا فى ضوء النجاحات التى تحققت فى فهم الكيمياء والنظرية الكهرومغناطيسية والديناميكا الحرارية . . فقد اتضح أن الضوء موجات . . وأن الإلكترون هو أحد مكونات المادة مما أشار إلى أن تركيب الذرات كهرومغناطيسي . وبدا أن الميكانيكا النيوتونية وقانون الجذب العام غير قابلين للمنافسة من حيث قدرتهما على التنبؤ بنتائج التجارب العملية . وظهر الكون التقليدى كما لو كان حتميًا تمامًا ، وأنه يعمل طبقًا لعدد محدود من المبادئ البسيطة كالساعة فى دقتها .

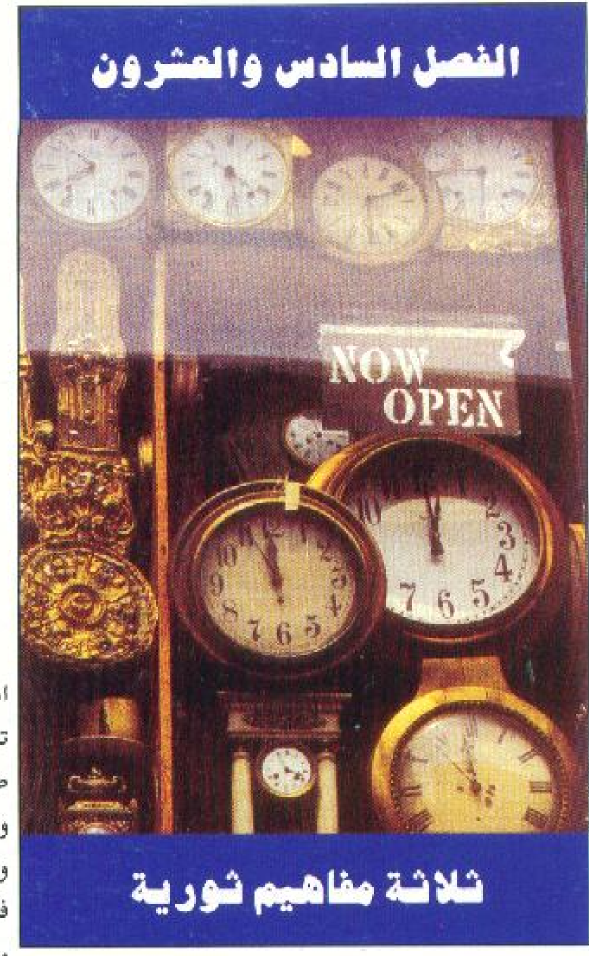
وإذ بدأ القرن العشرون فإن العديد من التجارب العملية الجديدة أفضت إلى نتائج لا تخضع لتفسيرات القوانين الكلاسيكية التى اختبرت من قبل . وقد شملت النتائج اكتشاف الذرة النووية ، والأسلوب الذى يتفاعل به الضوء مع الإلكترونات داخل الفلزات ، واكتشاف أن سرعة الضوء لا تتغير بتغير سرعة الراصد .

وهكذا أصبح من الضرورى حدوث ثورة جذرية فى مفاهيمنا حول ما نعرفه من القوانين الفيزيائية من أجل تفسير جميع المشاهدات الجديدة المحيرة . وضم الإطار المقترح للتفسيرات ، والذى نطلق عليه **الفيزياء الحديثة** ، مركبتين رئيسيتين هما : النظرية النسبية وميكانيكا الكم . . والنظرية النسبية مهمة من أجل تفسير المشاهدات المتعلقة بالأجسام التى تتحرك بسرعات كبيرة (تقترب من سرعة الضوء) . أما ميكانيكا الكم فقد أصبحت قادرة على تفسير تركيب وسلوك الذرات والنوى . وذلك بإثبات أن الجسيمات على مستوى صغير للغاية تسودها خصائص موجية . وأدى هذا إلى أن يستبدل باليقينية الكامنة فى الفيزياء الكلاسيكية ، عدم اليقين المميز للوصف الاحتمالى لتفاعل المادة والضوء على المستوى الذرى .

على أن الفيزياء الكلاسيكية التقليدية لا زالت صالحة بالنسبة لخبراتنا اليومية « العادية » ـ وهذا ما يضفى قيمة على أهمية دراستها . وخلاصة ما حدث هو أننا حين غادرنا عالم الظواهر العادية وانتقلنا إلى فحص الظواهر الدقيقة للغاية أو السريعة للغاية ، فقد كان علينا أن نترك وراءنا التحامل المرتبط بفطرتنا ونفسر الطبيعة بشروطها هى . وقد كان إنجاز هذا المدى العريض من العمل فى فترة قصيرة من التاريخ كالقرن العشرين ، بمثابة فخر ومجد للذكاء والروح البشرية . إلا أن القضية لم تغلق بعد ولعلنا ندرك هذا الآن ، أفضل مما فعلنا منذ قرن مضى .



الفصل السادس والعشرون



ثلاثة مفاهيم ثورية

استقر فى أذهان العديد من العلماء أنه بحلول عـام 1900 ، قـد تمـت معظـم الاكتشـافـات العظمـى فـى الفيزيـاء . ولكـى نكـون صادقين فإن قليلاً من المشكلات المزعجة قـد ظلـت بـلا حـل ، وإن بدا أن كل القوانين الفيزيائية الأساسية تقريبًا قد تم اكتشافها . وقد كان هذا الرأى كما سنرى فى هـذا الفصـل خاطئًـا تمامًـا . فقد ظلت جوانب شاسعة من السلوك الفيزيائى للطبيعـة عندئـذ مجهولة تمامًا .

وعندما نطالع تاريخ العلوم ، فإننا نكتشف أن كل تقدم علمى عظيم قـد كـان مقترنًـا باسم شخص واحد فحسب . فمن المعروف أن جاليليو هو رائد فهمنا لكيفية حدوث الحركة الانتقالية للأجسام ، وأن اسم نيوتن قد خلد مع قوانينه الثلاثة للحركة وفى قانون الجاذبية . وكان فاراداى رائدا فى فهم المغناطيسية ، أما ماكسويل فقد وحـد الظواهـر الكهربية والمغناطيسية من خلال معادلاته الأساسية الأربع . أى أن هذه الأمثلـة وغيرهـا كثير ، دليل على أن الفرد قادر بذكائه على إنارة جوانب ضخمة من العلم لنا جميعًا .

وليس معنى هذا أن هؤلاء الأفراد قد أنجـزوا اكتشافاتـهم بمعـزل عـن الآخريـن . إن العكس هو الصحيح . فمؤرخو العلوم يبينون بوضوح أن كلاً من هذه الاكتشافات قد جـاء تتويجاً لسنوات من عمل الكثير من العلماء الآخرين . فقد كتب نيوتن ذات مـرة ، « لـو أننى رأيت أبعد من الأخرين ، فذلك لأننى كنت أقف على أكتاف عمالقة » وحتى مـع هذه الشهادة فإن أناسًا آخرين وقفوا على أكتاف نفس العمالقـة ولكنـهم لم يـروا شيئًـا ! وبينما ينبغى علينا ألا ننسى فضل الأسلاف ، إلا أن عبقرية وبصيرة هؤلاء العلماء العظام

لا يجب أن تبخس وعلينا ألا نعيش مبجلين لأسلافنا العلميين لدرجة أن نقلل من قدرتنا الذاتية .

لقد نبعت الاكتشافات التى سندرسها فى هذا الفصل وما يليه من الفصول من مصادر غير متوقعة فى أغلب الحالات .

الجزء الأول : نظرية النسبية

26-1 فروض نظرية النسبية

لقد أجريت العديد من التجارب عبر القرون من أجل معرفة قوانين الطبيعة وفى عام 1905 وصل أينشتين إلى الاقتناع بأن المعلومات التجريبية تدفعنا إلى قبول حقيقتين حميدتين فى الطبيعة وهما :

1 إن سرعة الضوء فى الفراغ كما ثبت من القياسات تظل ثابتة $(c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s})$ بغض النظر عما إذا كان مصدر الضوء هو المتحرك أو من يقوم بالقياس .

2 إن السرعات المطلقة لا يمكن قياسها . والسرعات التى يمكن تعيينها فحسب هى السرعات بالنسبة لأجسام أخرى .

وعندما اقتنع أينشتين بصحة هاتين المقولتين فإنه تمكن من بيان أن الكثير من الجوانب غير المتوقعة للعالم من حولنا لا زالت فى طى المجهول . وقد عرف الاستدلال المنطقى له **بالنظرية النسبية***، وصارت المقولتان المعبرتان عن حقائق واضحة هما فرضيها الأساسيين .

ومن المستحيل إثبات هذين الفرضين بشكل مباشر ، فهما خلاصة إجماع كل الحقائق التجريبية المعروفة . ونعتقد أنه من الممكن ، وإن كان غير محتمل ، أن تتمكن بعض التجارب فى المستقبل من دحض أحدهما . ولكنهما مدعمتان فى الوقت الراهن بالعديد من المحاولات الفاشلة لدحضهما . أضف إلى ذلك ، كما سنرى لاحقًا ، أن فروض أينشتين قد أدت إلى نتائج مذهلة حققتها التجارب .

لقد كان الفرض الأول نتيجة لسلسة من التجارب التى بدأها عام 1887 أ.أ. ميكلسون وزميله أ.و. مورلى بالولايات المتحدة . وقد اعتقد معظم العلماء فى ذلك الوقت أن الموجات الضوئية تتذبذب داخل مادة تملأ الفضاء كله . وقد سميت هذه المادة ، التى وصفت قديمًا منذ القرن الرابع قبل الميلاد على يد أرسطو ، **بالأثير** . فمن ناحية كان على هذا الأثير أن يكون رقيقًا جدًا حتى يسمح للكواكب والنجوم أن تسبح عبره بحرية ، ومن ناحية أخرى كان لابد للأثير أن يتمتع بخواص المواد الجاسئة جدًا حتى يحمل الذبذبات المستعرضة للضوء بهذه السرعة الهائلة . ولم يكن من السهل قبول هذه

---

* سنناقش هنا نظرية النسبية الخاصة لأينشتين . وهى صالحة للتطبيق على أجسام غير معجلة (متسارعة) فقط . وقد قام أينشتين عام 1916 بعمل امتداد لنظريته لتشمل أجسامًا معجلة (متسارعة) وذلك فى إطار نظريته العامة .

التناقضات . ولكن العلماء تمسكوا بمبدأ الأثير جزئيًا لأنه وفر مناط إسناد ساكن يمكن قياس الحركة المطلقة فيه .

وقد ظن ميكلسون أن عليه أن يستطيع اكتشاف حركة الأرض عبر الأثير وذلك بمقارنة سرعة الضوء في اتجاه حركة الأرض حول الشمس مع سرعة الضوء في اتجاه مستعرض لهذه الحركة ، باستخدام مقياس للتداخل صممه بنفسه . وينشق الضوء عند دخوله المقياس إلى اتجاهين ، فيذهب جزء من الضوء في اتجاه حركة الأرض ، وينتقل الجزء الآخر في اتجاه متعامد مع حركة الأرض . وقد كان من المفترض أن الأثير يشبه نهرًا يسري عبر الجهاز حاملاً معه الضوء . ومثلما يقتضي الأمر قضاء فترات زمنية مختلفة عندما يقوم قارب برحلة ذهابًا وإيابًا باتجاه النهر ، وعندما يقوم بقطع نفس المسافة عندما يعبر النهر جيئة وذهابًا ، فإن نظرية الأثير تنبأت بأن شعاعي الضوء سيستغرقان فترات زمنية مختلفة لكي يعودا إلى النقطة التي إنشقا عندها . وكان على هذا الاختلاف في الزمن أن يُحدث اختلافًا في الطور بين الشعاعين ، من شأنه أن يشاهد على هيئة هدبات للتداخل عندما يتحد الشعاعان مرة أخرى .

وسرعة الأرض عند تحركها في مدارها حول الشمس تبلغ $10^{-4}c$ تقريبًا ، وهو مقدار يقع في نطاق جهاز التداخل لميكلسون . على أن المحاولات المتكررة لقياس التأثير المتوقع **لم تسفر عن أي ظواهر تداخل على الأطلاق** . وقد استنتج ميكلسون أنه لا يوجد شيء اسمه الأثير يسري عبر الجهاز ، وأن سرعة الضوء هي نفسها في كل من المسارين . وقد تأكدت هذه النتيجة عندما أجريت تجارب أخرى على جانب متزايد من الدقة عبر القرن العشرين كله مما جعل أينشتين يتخذها بمثابة فرضه الأول .

وربما احتاج الفرض الثاني إلى بعض التفسير . نعلم أنه من اليسير قياس السرعات النسبية للأجسام . فعداد السرعة في السيارة يدل على السرعة التي تتحرك بها السيارة بالنسبة للطريق ، ولكن هذه السرعة ليست مطلقة . والكرة الأرضية تتحرك بسبب دورانها حول محورها ودورانها حول الشمس . وحيث أننا نعرف هاتين السرعتين ، فنستطيع إذا أردنا أن نحسب سرعة السيارة بالنسبة للشمس .

وتتحرك الشمس نفسها في مجرتنا ، درب التبانة ، كما أن المجرة في حركة بالنسبة لنجوم أكثر بعدًا . ويبدو أنه ليست هناك طريقة لتعريف سرعة مطلقة محددة لجسم ما ، لأن كل شيء يبدو في حركة . وكل ما نستطيع قوله هو مدى سرعة جسم ما متحرك بالنسبة لجسم آخر .

وهناك طريقة أخرى لعرض الفرض الثاني ، وهي طريقة تعطينا لمحة عن أهميتها الأساسية ، وهي تتم عادة بدلالة مناطات الإسناد . **ومناط الإسناد هو أي نظام للإحداثيات تؤخذ القياسات بالنسبة إليه** . فموضع أريكة أو منضدة أو كرسي مثلاً ، يمكن أن يوصف بالنسبة لجدران حجرة ما . وتصبح هذه الحجرة هي مناط الإسناد المستخدم . أو قد نعتبر ذبابة تقف على نافذة سيارة متحركة . حيث نستطيع وصف موقع الذبابة في السيارة باستخدام السيارة كمناط إسناد . وكمثال آخر نستطيع وصف

موقع سفينة فضاء بالنسبة لمواقع نجوم بعيدة . ويصبح نظام الإحداثيات المبنى على هذه النجوم هو مناط الإسناد .

2` تكون القوانين الأساسية للطبيعة هي نفسها في جميع مناطات الإسناد التي تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض .

وكثيرًا ما يتم اختزال هذا النص باستخدام مصطلح **مناط الإسناد ذو القصور الذاتي** ومناط الإسناد ذو القصور الذاتي **هو نظام للإحداثيات ينطبق بداخله قانون القصور الذاتي** : يبقى جسم ما في حالة سكون مالم تؤثر عليه قوة غير متعادلة فتكسبه تسارعًا (عجلة) كما تطبق قوانين الطبيعة الأخرى في مثل هذا النظام . ويمكننا - بدرجة جيدة من التقريب - اعتبار كل النظم المرجعية المتحركة بسرعة ثابتة بالنسبة لنجوم بعيدة بمثابة مناطات ذات قصور ذاتي . وهكذا نجد بين أيدينا نصًا ثالثًا للفرض الثاني :

2`` تكون القوانين الأساسية للطبيعة هي نفسها في جميع مناطات الإسناد ذات القصور الذاتي .

ويمكنك فهم العلاقة بين هاتين الطريقتين المترادفتين للنص على الفرض الثاني إذا أخذنا ما يلي في الاعتبار . عندما نقول أننا نستطيع قياس سرعات نسبية فقط فإننا نفترض بذلك عدم وجود انحياز في مناطات الإسناد . فقد تكون إحدى سفن الفضاء ، مثلاً ، متجهة إلى القمر بسرعة 10^5 km/day بالنسبة للقمر نفسه ، وصحيح أيضًا أن القمر يتجه إليها بنفس السرعة ، 10^5 km/day . ويمكن التحقق بسهولة من حقيقة أن أحدهما يتحرك بالنسبة للآخر ، ولكن النصين متكافئان ، ولا يمكن أن يقال أن أيًا من الجسمين في حالة سكون بالمعنى المطلق .

افترض - مع هذا - أن قانونًا من قوانين الطبيعة يعتمد على سرعة مناط الإسناد سيستطيع الأشخاص الموجودون بسفينة الفضاء أن يستخدموا مثل هذا القانون لكي يحددوا سرعتهم ، كما يستطيع الأشخاص على القمر فعل نفس الشيء . . وستكون السرعتان المقاستان مختلفتين . ونتيجة لذلك سيتمكن الأشخاص من قياس أكثر من مجرد سرعاتهم النسبية . والواقع ، أن القانون سوف يستخدم لتشييد تدريج مطلق للسرعات ، وهو ما يناقض الفرض الثاني الذي نعتبره نحن وأينشتين صحيحًا . ونستنتج من ثم أن جميع قوانين الطبيعة لابد وأن تكون هي نفسها في كل مناطات الإسناد ذات القصور الذاتي .

26-2 سرعة الضوء كحد أعلى للسرعة

نستطيع الآن أن نبرهن بالمنطق وحده وباستخدام فرضي أينشتين أنه :

لا يمكن لأي جسم مادي أن يتسارع ليكتسب سرعات أكبر من سرعة الضوء في الفراغ .

ومن السهل البرهنة على صحة هذه المقولة بالطريقة البسيطة التالية . وسنقوم بهذا

متبعين أسلوبًا معروفًا باسم **البرهان غير المباشر** ، ويتم فيه دحض القضية (وهى فى هذه الحالة ، أن جسمًا ما يستطيع الانتقال بسرعة أكبر من c) . وذلك بإثبات أن هذا يؤدى إلى نتيجة زائفة معروفة (وهى فى هذه الحالة أن راصدًا سوف يقيس قيمة تختلف عن c لسرعة الضوء) .

افترض أن لدينا محطتين فضائيتين غير متحركتين بتسارع (غير معجلتين) وهما المحطتان A و B فى الشكل 1-26 ويقومان بعمل مناطى إسناد ذوى قصور ذاتى . وقد أصدر راصدان على كل من A و B تعليماتهما إلى قائد سفينة الفضاء بأن يمضى بها فى خط مستقيم بين A و B بسرعة قصوى ثابتة . وبمجرد أن تمرق بالمحطة A فإنها ترسل نبضة ضوئية من مقدمة السفينة نحو المحطة B . ومن الطبيعى أن المحطتين A و B تعملان بالتنسيق مع بعضهما ولذلك فهما تستطيعان تعيين سرعة سفينة الفضاء وذلك بتحديد زمن طيرانها من A إلى B . سنقوم الآن بطرح افتراض زائف وهو أنهما وجدا أن سرعتها مساوية $2c$.



شكل 1-26:
ما هى أقصى سرعة تتحرك بها سفينة الفضاء بين المحطتين الفضائيتين ؟



يمكن تعجيل البروتونات إلى سرعات تقترب من سرعة الضوء بواسطة معجلات الجسيمات الحديثة مثل هذا المعجل فى معمل فيرمى فى باتافيا بولاية إلينوى ، حيث تقوم مجالات مغناطيسية هائلة بجعل البروتونات تسلك مسارًا دائريًا . وقد صنعت المغناطيسات الحمراء والزرقاء (الحلقة العليا) من ملفات تقليدية من النحاس . أما المغناطيسيات الصفراء والحمراء فهى مغناطيسات فائقة التوصيل . ويبلغ طول المسارات الدائرية فى هذا المعجل أربعة أميال .

لقد أرسلت سفينة الفضاء نبضة ضوئية وهى تمرق بجوار A ، وحيث أن قوانين الطبيعة لابد وأن تكون قائمة بالنسبة للراصدين الثلاثة ذوى القصور الذاتى كلهم (وهم A و B وقائد السفينة) ، فإن النبضة الضوئية لابد وأن يكون سلوكها هو نفسه - أى سلوكًا طبيعيًا - بالنسبة لكل منهم . علينا تذكر أن قائد السفينة لا يستطيع تحديد ما إذا كانت

السفينة تتحرك أم لا بالمعنى النسبى ، وعلى ذلك فلابد له أن يرى نبضة الضوء وهو تسبق السفينة بسرعة مقدارها c فتصل إلى B قبل السفينة . وهكذا فالراصدان A و B إذ يعملان معًا سيريان أن النبضة الضوئية تتحرك أسرع من السفينة . ولكنهما قاسا سرعة السفينة ووجداها تتحرك بسرعة مقدارها $2c$ أى أنهما اكتشفا أن سرعة نبضة الضوء أكبر من $2c$. ولكن هذه النتيجة مستحيلة لأنها تتناقض مع الحقيقة المعروفة أن جميع الراصدين سيحصلون على سرعة واحدة للضوء وهى c . ولنا ، إذن ، أن نستنتج ، أن الفرض الذى طرحناه فى البداية كان زائفًا ، وأن السفينة لا يمكن أن تكون قد تحركت بين A و B بسرعة مقدارها $2c$.

وستؤدى هذه التجربة دائمًا إلى هذا التناقض طالما أصررنا على أن سرعة السفينة أكبر من c . ونستنتج من ذلك أن سفينة الفضاء لا يمكنها أن تطير بسرعة أكبر من سرعة الضوء المقاسة c . ونستطيع بالفعل ، أن نوسع من هذا الاستدلال المنطقى ليشمل كل الأجسام المادية والإشارات التى تحمل طاقة ، وتكون نتيجة هذا أن ننص على أنه :

لا يمكن لأى شيء يحمل طاقة أن يعجِّل حتى تصل سرعته إلى سرعة الضوء c .

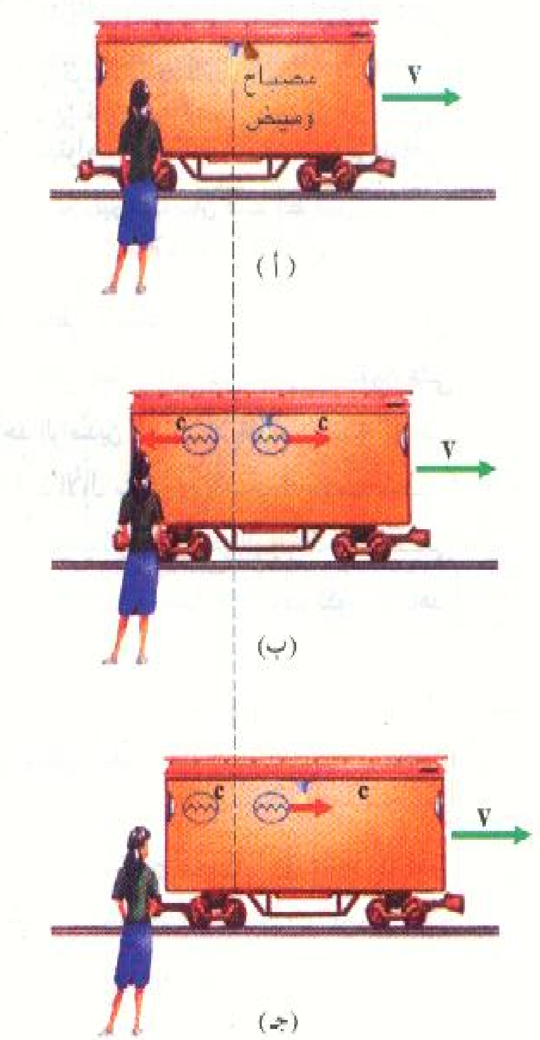
وسنرى كلما أوغلنا فى هذا الفصل أن هذه النتيجة لنظرية أينشتين قد اختبرت مرارًا وتكرارًا وبعناية فائقة وأثبتت جميع الاختبارات صحتها .

26-3 التزامن

من المتوقع عادة أن اثنين من الراصدين سيتفقان فيما بينهما إذا كانت حادثتان تقعان فى نفس اللحظة أم لا . إلا أن أينشتين قد أثبت أنه تحت ظروف معينة لا تتفق النتيجة المتوقعة مع الواقع . والفرضان الأساسيان للنسبية يدفعاننا إلى استنتاج أن الحدثين المتزامنين فى مناط إسناد ذى قصور ذاتى قد لا يكونان متزامنين فى مناط إسناد آخر . ولإيضاح هذه الفكرة ببساطة فإننا نلجأ مرة أخرى إلى تجربة ذهنية . وسيكون انتشار نبضة ضوئية كما يرصدها اثنان من الراصدين ذوى القصور الذاتى هو أساس تجربتنا .

افترض أن مقطورة سيارة تتحرك نحو اليمين بسرعة عالية جدًا وثابتة كما فى الشكل 2-26 (أ) ، وأن هناك مصباح وميض عند منتصف المقطورة تمامًا وأنه حين يومض يبعث بنبضات ضوئية نحو اليمين ونحو اليسار . وقد جهزت المقطورة بخلايا كهروضوئية عند كل من طرفيها ، بحيث يستطيع شخص بالمقطورة أن يكتشف لحظة وصول النبضات الضوئية إلى طرفى المقطورة . كما تستطيع سيدة باستخدام جهاز مبتكر أن تقيس حركة النبضتين وهى واقفة ساكنة فوق الأرض . وحيث أن الراصدين موجودان فى مناطى إسناد ذوى قصور ذاتى (وهما المقطورة والأرض) ، فإن كلاً منهما لابد أن يرى نبضتى الضوء وهما تسلكان تبعًا لنفس قوانين الفيزياء . أى أن كلاً من الرجل والسيدة لابد أن يلاحظا أن النبضتين تنتقلان من مصباح الوميض بسرعة مقدارها c . أضف إلى ذلك أن الرجل سيلاحظ أن النبضتين تصلان إلى الكاشفين عند طرفى المقطورة

المتقابلين فى نفس الوقت ، لأنهما سيقطعان نفس المسافة بالضبط ، فى مناط الإسناد الخاص به (وهو المقطورة) .



شكل 2–26:
خلافًا للراصد ذى القصور الذاتى داخل المناط المتحرك ، فإن الراصد الساكن على الأرض لن يرى أن نبضتى الضوء تصلان إلى طرفى المقصورة فى نفس الوقت .

ولنأخذ حالة الرجل أولاً . بالنسبة له ستكون التجربة غاية فى البساطة . فالمصباح ساكن بالنسبة له ومستقر عند منتصف المقطورة . وعندما يومض المصباح فإن نبضتين ضوئيتين تنتقلان مسافتين متساويتين إلى طرفى المقطورة فى زمنين متساويين . (تذكر أنه بالنسبة للرجل لن تختلف التجربة سواء كانت المقطورة تتحرك أم لا . لأن الفرض الثانى يقتضى نتائج متطابقة بالنسبة لأى مناط إسناد ذى قصور ذاتى) . ومن ثم فإن النبضتين الضوئيتين تصلان إلى طرفى المقطورة فى نفس اللحظة أى تكونان متزامنتين .

اعتبر الآن كيف ترى السيدة التجربة . إن قياساتها تظهر أن التجربة تسير طبقًا لقوانين الفيزياء ولذا فإن الموقف يتطور كما فى الشكلين 2–26 (ب) و (جـ) ويلاحظ أن النبضتين تقطعان مسافتين متساويتين إلى اليمين وإلى اليسار فى زمنين متساويين . ولكن حيث أن المقطورة تتحرك نحو اليمين فإن المسافة التى على الضوء قطعها كى يصل إلى الخلية الكهروضوئية اليسرى ستصبح أقصر . ونتيجة لذلك فإن السيدة ستقيس النبضة التى على اليسار على أنها تصل إلى الطرف الأيسر للمقطورة قبل أن تصل النبضة الأخرى إلى الطرف الأيمن . وطبقًا لما ستقوله فإن النبضتين لا تصلان إلى الطرفين فى نفس اللحظة أى لن تكونا متزامنتين .

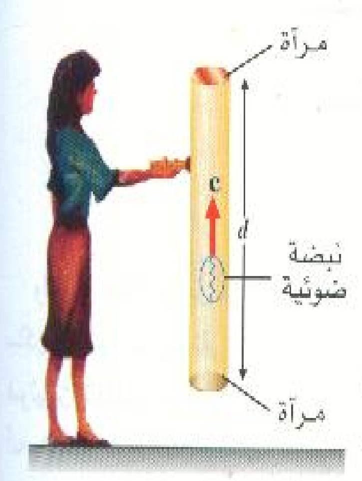
ونستنتج من ثم أن الزمن ليس كمية بسيطة ، لأن :

الأحداث إذا رصدت على أنها متزامنة فى نظام ذى قصور ذاتى فإنها لن ترصد على أنها متزامنة فى نظام ذى قصور ذاتى آخر يتحرك بالنسبة للنظام الأول .

وتبين الاعتبارات المتوالية أن هذا الموقف سيتواجد فقط إذا حدث الحدثان فى موقعين مختلفين . وفى المثال الذى بين أيدينا فإن الحدثين يحدثان عند الطرفين المتقابلين للمقطورة .

من النتائج اللازمة لانعدام التزامن فى مناطى الإسناد ، أن الحدثين اللذين يقعان فى موضعين مختلفين سيظهران لراصدين فى مناطى إسناد ذوى قصور ذاتى مختلفين على أن تتابعهما معكوس . أى أنه لو رأى أحد الراصدين الحدث A يتبعه الحدث B فمن الممكن أن راصدًا آخر يتحرك بالنسبة للراصد الأول سيرى أن الحدث B يتبعه الحدث A . وهذا الأمر ممكن الحدوث فقط لو أن أحد الحدثين لم يكن هو المسبب للحدث الثانى فيزيائيًا . فلو كان A يسبب B فإن العلاقة السببية (A يسبق B) سوف تكون مشاهدة من كل الراصدين وإن كان هناك فترة تخلف زمنى فيما بينهم .

26-4 الساعات المتحركة تدور بشكل أبطأ



شكل 3-26:
تسجل الساعة الضوئية طقة واحدة فى كل مرة تنعكس فيها النبضة الضوئية من على المرآة السفلى .

لقد لاحظنا من نتائج القسم السابق أن الزمن ليس بالكمية البسيطة . وقد أشار أينشتين إلى هذا عندما أثبت أن المعدل الذى تطقطق به ساعة لشخص يمسك بها يختلف عن المعدل الذى يرصده شخص يمرق من أمام الساعة . وسوف نعرض هذه الظاهرة من خلال تجربة ذهنية باستخدام ساعة خاصة جدًا ، وإن كان أينشتين قد أثبت بشكل عام أنها حقيقية وصحيحة .

اعتبر الساعة التى تمسك بها السيدة فى الشكل 3-26 . إنها عبارة عن نبضة ضوئية تنعكس بين مرآتين مثبتتين داخل أنبوبة أسطوانية مفرغة . وفى كل مرة تصل فيها النبضة الضوئية إلى المرآة السفلى فإن الساعة تطقطق معلنة وحدة زمنية سنطلق عليها « طقة » . فإذا كان طول الأنبوبة $d = 1.5$ m فإن السيدة ستجد أن

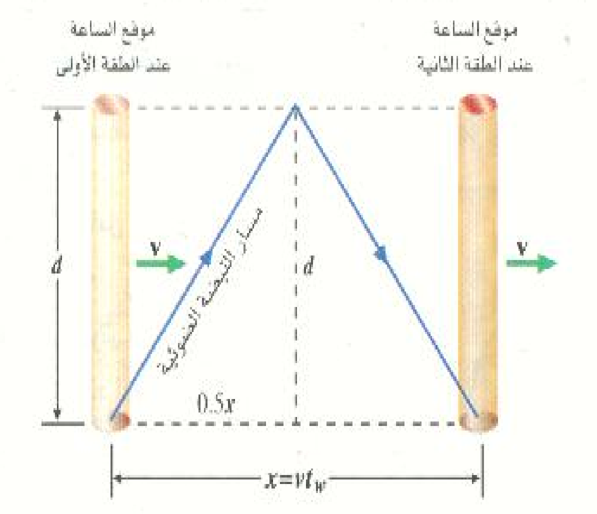
$$\text{طقة واحدة} = \frac{2d}{c} = \frac{3.0\ \text{m}}{3.0\times10^{8}\ \text{m/s}} = 10^{-8} s$$

افترض الآن أن شخصًا داخل سفينة فضاء ، يستخدم ساعة شبيهة بهذه الساعة وتخيل أن السيدة تنظر من نافذة معملها (الموجود فى سفينة فضاء أخرى) وترى الرجل يمرق من أمامها بسرعة مقدارها v . وأنها فرحت حين عرفت أنه يستعمل ساعة تشبه ساعتها وأسرعت تتصل به باللاسلكى (بالراديو) : فأخبرها أن ساعته تعمل جيدًا وأنها تطقطق الزمن كالمعتاد ، أى طقة واحدة كل $(2d/c)$ ثانية .

وبعد تفكير لبرهة وجيزة تكتشف السيدة أن هناك أمرًا غريبًا ، فقد استنتجت أن ساعة الرجل لابد وأنها تطقطق الزمن بشكل أبطأ من ساعتها . ونستطيع أن نفهم منطق

السيدة كما يلى :

حيث أن ساعة الرجل تعمل بشكل صحيح بالنسبة له، فإن السيدة تعلم أن ساعته لابد أن تعمل طبقاً للشكل 4–26 ؛ حيث تظهر الساعة فى موضعين عند « طقتين » متعاقبتين . وعلى الرغم من أن الرجل يرى نبضة الضوء فى حركة مستقيمة إلى أعلى



شكل 4–26: لابد للنبضة الضوئية فى الساعة المتحركة أن تنتقل مسافة أكبر من $2d$ أثناء فترة « طقة » واحد . ويكون طول مسار النبضة الضوئية هو $2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}vt_w)^2}$

وإلى أسفل فى الساعة ، فإن السيدة تؤكد أن النبضة تتحرك فى نفس الوقت إلى اليمين لأن الساعة نفسها تتحرك إلى اليمين* . وتحسب السيدة الزمن بين طقتين حسب ساعة الرجل كما يلى :

طبقاً للسيدة فإن النبضة تتحرك مسافة تمثل بالخط الأزرق فى الشكل . ومن نظرية فيثاغورس والأبعاد المبينة بالشكل فإننا نرى أن :

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}x)^2}$$

وتعلم السيدة أن ساعة الرجل تمر أمامها بسرعة مقدارها v . وبعد ذلك ، فطبقاً لساعتها فإن ساعة الرجل ستستغرق زمناً قدره t_w حتى تنتقل من موقع إلى آخر . وعلى ذلك فهى تعرف أن $x = vt_w$. ونتيجة لذلك ، وطبقاً لهذه السيدة ،

$$\text{طول مسار النبضة} = 2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}vt_w)^2}$$

وتعلم السيدة بعد ذلك أن نبضة الضوء تتحرك دائماً عبر الفراغ بسرعة مقدارها c ومن ثم ـ وطبقاً لمعلوماتها ـ فإن الزمن الذى يستغرقه التغير فى الموقع والمبين فى الشكل 4–26 يجب أن يكون :

$$t_w = \frac{\text{طول مسار النبضة}}{c} = \frac{2\sqrt{d^2+(\frac{1}{2}vt_w)^2}}{c}$$

ويؤدى بنا حل هذه المعادلة إلى إيجاد قيمة t_w ،

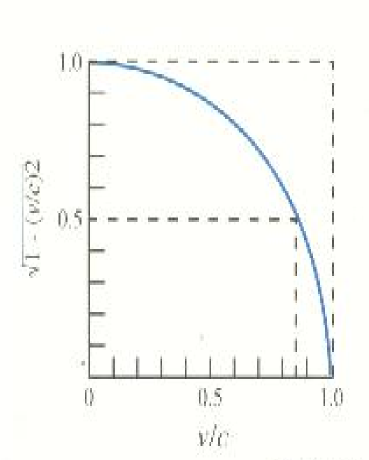
* قد يطرأ على ذهنك السؤال التالى : « أيهما على حق ؟ » إن كليهما على حق كما سنرى على الفور ، فكل شخص يصف السلوك بشكل صحيح وكما يقيسه فى مناط إسناده .

$$t_w = \frac{2d/c}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

ولكننا عرفنا أن $2d/c$ هو الزمن الذى يصر الرجل على أنه الزمن الذى تستغرقه ساعته لكى تحدث « طقة » واحدة . ومن ثم يصبح لدينا النتيجة التالية :

$$\left(\text{الفترة الزمنية كما تعينها الساعة المتحركة}\right) \times \left[\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right] = \text{الفترة الزمنية كما تعينها الساعة الساكنة}$$

ويسمى المقدار $\sqrt{1-(v/c)^2}$ **مُعامل النسبية** . يبين الشكل 5-26 . العلاقة البيانية بين معامل النسبية والمقدار v/c ، ويلاحظ أن هذا المعامل يساوى الوحدة تقريبا إلى أن تصبح السرعة أكبر من نحو 10 بالمائة من سرعة الضوء . وحتى عندما $v = 0.10\,c$ فإن هذا المعامل يساوى 0.995 . وفى معظم مشاهداتنا اليومية تقريبًا فإننا لا نتعامل مع تأثيرات النسبية لأننا لا نلتقى مطلقا بسرعات تبلغ هذه القيم الهائلة . على أننا عندما نعالج الجسيمات الذرية معمليًا ، فإن ظواهر النسبية تصبح أكثر شيوعًا ولا نستطيع تفسير النتائج المعملية دون أن نأخذ معادلات أينشتين فى الاعتبار .



شكل 5-26:
يختلف مُعامل النسبية بشكل محسوس عن الوحدة ، فقط ، عند سرعات تقترب من سرعة الضوء .

وسنعرض الآن مثالاً على تأثير مُعامل النسبية . افترض أن الرجل يعرق أمام السيدة بسرعة تبلغ $0.75\,c$. عندئذ يكون المقدار $\sqrt{1-(v/c)^2}$ مساويًا 0.66 ومقلوبه 1.51 . وتحت هذه الظروف فإن ساعة السيدة ستحدث 1.51 طقة خلال الزمن الذى تعلم السيدة فيه أن ساعة الرجل ستحدث طقة واحدة . وكما نرى فإن الساعة المتحركة تطقطق الزمن بشكل أبطأ من الساعة الساكنة .

تطقطق الساعة التى تتحرك بسرعة مقدارها v زمنا مقداره $\sqrt{1-(v/c)^2}$ ثانية خلال زمن قدره ثانية واحدة على الساعة الساكنة .

وبعد أن وصلت السيدة إلى هذه النتيجة غير المتوقعة فإنها اتصلت بالرجل عبر الراديو وأخبرته بأنها اكتشفت أن الساعات المتحركة تطقطق الزمن أكثر بطئًا وقبل أن تشرح له التفاصيل بادرها بقوله أنه كان يفكر طوال الوقت فى نفس الموضوع وأنه قد اكتشف أن ساعتها التى كانت تتحرك بالنسبة إليه بسرعة مقدارها v كانت تطقطق الزمن أكثر بطئًا من ساعته . وعندئذ تذكر الاثنان أن الحركة النسبية فقط هى التى تحمل معنى . ولم تكن أى من الساعتين ذات سمات خاصة .

ستبدو أى ساعة تتحرك بالنسبة لراصد ما على أنها تطقطق الزمن أكثر بطئًا من ساعة ساكنة بالنسبة للراصد .

ويطلق على هذه الظاهرة **تمديد الزمن** ، لأن الزمن قد « استطال » على نحو ما بالنسبة للساعات المتحركة .

تنطبق هذه النتيجة المدهشة على جميع آليات التوقيت مهما كان تعقيدها . فلو كان الرجل يستخدم معدل نمو فطر ما بدلاً من الساعة لكانت السيدة قد وجدت أن معدل نمو

القطر يتباطأ بسبب رحلته . بل أنه حتى تقدم جسم الإنسان في العمر يتباطأ عند الحركة بسرعات كبيرة ، كما سنرى في أحد الأمثلة التالية .

على أن هناك نقطة واحدة ، على المرء أن يتذكرها دائمًا . تعمل الساعة الجيدة دائمًا بشكل طبيعي كما يراها شخص يكون ساكنًا بالنسبة لها . أما الراصدون الذين يمرون أمام الساعة فقد يزعمون أنها تطقطق الزمن أكثر بطئًا وعلى الرغم من هذا فالساعة لا زالت تطقطق الزمن بشكل صحيح كما يراها الراصد الساكن بالنسبة لها . ويطلق على الزمن الذى تطقطقه الساعة حين تكون ساكنة بالنسبة للراصد **الزمن الصحيح** .

مثال توضيحى 26-1

من الأمثلة المثيرة عن تمديد الزمن ، ما نحصل عليه عند قياس الفترة التى « تعيشها » الجسيمات غير المستقرة . فجسيم يطلق عليه بيون ـ مثلاً ـ يعيش نحو 2.6×10^{-8} s فحسب في المتوسط حين يكون ساكنًا في المعمل ؛ ويتحول بعد هذه الفترة إلى صورة أخرى . كم سيبلغ عمر مثل هذا الجسيم لو أنه انطلق عبر المعمل بسرعة مقدارها $0.95\,c$ ؟

استدلال منطقى :

يتحرك البيون بسرعة مقدارها $0.95\,c$ بالنسبة للراصدين الموجودين فى المعمل . ويجب أن تثبت التجارب أن ساعة البيون الداخلية التى تحكم الفترة التى يعيشها ؛ لابد أن تتباطأ بسبب حركته . والزمن 2.6×10^{-8} s الذى تبينه الساعة المتحركة سيكون على النحو التالى عندما تبينه ساعة المعمل :

$$\text{عمر البيون طبقًا لساعة المعمل} = \frac{2.6\times10^{-8}\ \text{s}}{\sqrt{1-(0.95)^2}} = 8.3\times10^{-8}\ \text{s}$$

وكما نرى فالجسيم المتحرك يجب أن يعيش لفترة أطول ثلاث مرات من الجسيم الساكن . لقد أجريت تجارب كهذه وتجارب أخرى شبيهة ووجد أن نتائجها جميعًا تتفق مع النتائج المحسوبة .

تمرين : ما السرعة التى يتحرك بها البيون إذا كان « يعيش » 10^{-7} s ؟

الإجابة : $v/c = 0.966$.

مثال 26-1

إن أقرب نجم من مجموعتنا الشمسية هو ألفا سنتورى الذى يبعد عن الأرض مسافة 4.1×10^{16} m ، وحيث أن الضوء ينتقل بسرعة 3×10^{8} m/s فإن نبضة الضوء الصادرة من ذلك النجم تستغرق 1.37×10^{8} s أو 4.3 yr. كى تصل إلى الأرض . (ولذا يقال أن المسافة إلى ذلك النجم 4.3 سنة ضوئية) . كم من الوقت تستغرقه سفينة فضاء فى رحلة ذهابًا وإيابًا إلى ذلك النجم ـ مقاسًا بالساعات الأرضية ؛ إذا كانت سرعتها $0.9990\,c$ ؟ وكم تبلغ هذه الفترة طبقًا للساعات الموجودة بالسفينة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : بالنسبة لأى شىء قيست سرعة سفينة الفضاء ؟

الإجابة : اعتبر أن المسافة بين الأرض وألفا سنتورى ثابتة وسرعة السفينة بالنسبة للأرض 0.9990 c . وتتفق قياسات الأشخاص الموجودين على ظهر السفينة والأشخاص الباقين على الأرض حول هذه القيمة .

سؤال : أى الساعات ستقيس الوقت « الصحيح » ؟

الإجابة : إنها الساعات الأرضية لأنها ساكنة فى نظام مناط إسناد الأرض ـ ألفا سنتورى .

سؤال : ما هى السرعة التى سيبدو أن ساعات سفينة الفضاء تدور بها ؟

الإجابة : ستبدو تلك الساعات وهى تدور أبطأ بمقدار معامل النسبية ، $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

الحل والمناقشة : ستقيس الساعات الأرضية زمن رحلة الذهاب والإياب على أنها :

$$t = \frac{d}{v} = \frac{2(4.3 \text{ light yr.})}{1.0 \text{ light yr./yr.}} = 8.3 \text{ yr.}$$

ومعامل النسبية هو

$$\sqrt{1-(0.999)^2} = 0.045$$

وعلى ذلك ستكون ساعات سفينة الفضاء قد قاست زمنًا مقداره :

$$(8.6 \text{ yr.})\,(0.045) = 0.39 \text{ yr.}$$

فقط

وهو أقل قليلاً من خمسة أشهر !

وبهذه المناسبة فإن أحد توائم الملاحين بالسفينة قد ترك على سطح الأرض فزاد عمره 8.6 yr. خلال زمن الرحلة ، فى حين أن توأمه على ظهر سفينة الفضاء قد زاد عمره 0.39 yr. فحسب . وقد نوقشت هذه الظاهرة التى أطلق عليها **التناقض الظاهرى للتوائم** بالتفصيل من جانب العلماء ، الذين اتفقوا بشكل عام على أن هذه النتيجة صحيحة وأن التوأمين سيزداد عمراهما بشكل مختلف*.

26-5 الانكماش النسبوى للطول

تقتضى ظاهرة تمديد الزمن وجود ظاهرة غريبة تتعلق بالأطوال المقاسة . ولكى ندرك كنه هذه الظاهرة علينا أن نرجع مرة أخرى إلى مثال الرجل والسيدة الذى ذكر فى القسم السابق . دعنا نعتبر أن السيدة مستقرة على الأرض بينما يسافر الرجل بسرعة مقدارها v على طول خط مستقيم يمتد من الأرض إلى النجم ألفا سنتورى . ويفيدنا رجال الفلك الموجودون على الأرض أن النجم يبعد عن الأرض مسافة مقدارها $d = 4.1 \times 10^{16}$ m .

* ولكى نختبر هذه الظاهرة فإن ساعة غاية فى الدقة قد نقلت على متن طائرة حول الأرض ثم قورنت مع ساعة « توأم » لها ساكنة . وقد وجدت النتيجة المتوقعة . وإذا أردت الإطلاع على مناقشة للتجربة فارجع إلى المرجع التالى : J.Hafele, Physics Teacher, 9,414, (1971) .

وحيث أنه من السهل قياس السرعات النسبية ، فإن كلاً من الرجل والسيدة متفقان على أن سرعة كل منهما بالنسبة للآخر هي v عندما أخذ الرجل في الانطلاق داخل سفينة الفضاء من الأرض نحو النجم . أما السيدة فهي ساكنة في مناط إسناد تكون فيه الأرض والنجم أيضًا في سكون أنها ترى أن الرجل يمرق أمامها بسرعة مقدارها v .

الرجل ساكن بالنسبة لسفينته الفضائية ويعتبر السفينة نفسها هي مناط إسناده .

وكل من الأرض والنجم يعتبران في حركة بسرعة مقدارها v بالنسبة للسفينة .

دعنا الآن نفحص رحلة الرجل من الأرض إلى النجم من واقع أفضلية السيدة .

إنها تعلم أن المسافة من الأرض إلى النجم ، وكلاهما في سكون بالنسبة لمناط إسنادها هي $d_e = 4.1 \times 10^{16}\ \text{m}$ ، حيث يرمز الحرف e إلى الأرض . وباستعمال العلاقة $x = vt$ فإنها ستحسب الزمن الذى تسجله الساعة الأرضية لرحلة الرجل نحو النجم على أنه :

$$t_e = \text{الزمن الأرضي} = \frac{d_e}{v}$$

وبالفعل ، حين تستدير السفينة عائدة إلى الأرض بعد أن بلغت النجم ، فإن الزمن الذى استغرقته الرحلة كلها سيكون $2\,t_e = 2d_e / v$.

إلا أن حسابات الرجل ستكون مختلفة فحسب الساعات الموجودة بسفينة الفضاء سيكون زمن الرحلة من الأرض إلى النجم هو t_s . ومن ثم يستطيع أن يحسب المسافة إلى النجم على أنها $x = vt$ ويصل إلى :

$$d_s = vt_s$$

حيث يشير الحرف s إلى القياسات التى تمت في مناط إسناد ساكن بالنسبة لسفينة الفضاء وبإجراء حسابات مماثلة لرحلة العودة فإنه يجد أن الرحلة بأكملها قد قطعت مسافة $2d_s$ في زمن مقداره $2t_s$.

وعلى ذلك يصبح لدينا المعادلتان التاليتان وهما صحيحتان دون أدنى شك بالنسبة للراصدين اللذين صاغاهما :

$$2d_e = v(2t_e) \qquad , \qquad 2d_s = v(2t_s)$$

ولكننا نعرف أن تمديد الزمن يؤثر على ساعة سفينة الفضاء ، بحيث أننا لو قارناها بالساعة الأرضية عند عودة السفينة إلى الأرض فسنجد أن :

$$t_s = \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\,.\,t_e$$

أى أن ساعة سفينة الفضاء قد طقطقت الزمن بشكل أبطأ من الساعة الأرضية .

وبالتعويض من هذه القيمة للزمن t_s في معادلة d_s نجد أن :

$$d_s = v\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\,.\,t_e$$

على أن $d_e = vt_e$ ولذلك فإن $t_e = d_e / v$. وإذا استخدمنا هذه القيمة للزمن t_e فإن :

وحيث أنه من السهل قياس السرعات النسبية ، فإن كـلاً مـن الرجـل والسيدة متفقان على أن سرعة كل منهما بالنسبة للآخر هى v عندما أخذ الرجـل فـى الانطلاق داخـل سفينة الفضاء من الأرض نحو النجم . أما السيدة فهى ساكنة فى مناط إسناد تكـون فيـه الأرض والنجم أيضًا فى سكون أنها ترى أن الرجل يمرق أمامها بسرعة مقدارها v .

الرجل ساكن بالنسبة لسفينته الفضائية ويعتبر السـفينة نفسها هـى مناط إسناده . وكل من الأرض والنجم يعتبران فى حركة بسرعة مقدارها v بالنسبة للسفينة .

دعنا الآن نفحص رحلة الرجل من الأرض إلى النجم من واقع أفضلية السيدة .

إنها تعلم أن المسافة من الأرض إلى النجم ، وكلاهما فى سكون بالنسبة لمناط إسنادها هى $d_e = 4.1 \times 10^{16}$ m ، حيث يرمز الحرف e إلى الأرض . وباستعمال العلاقة $x = vt$ فإنها ستحسب الزمن الذى تسجله الساعة الأرضية لرحلة الرجل نحو النجم على أنه :

$$t_e = \text{الزمن الأرضى} = \frac{d_e}{v}$$

وبالفعل ، حين تستدير السفينة عائدة إلى الأرض بعد أن بلغت النجم ، فإن الزمن الذى استغرقته الرحلة كلـها سيكون $2\,t_e = 2d_e/v$.

إلا أن حسابات الرجل ستكون مختلفة فحسب الساعات الموجودة بسفينة الفضاء سيكون زمن الرحلة من الأرض إلى النجم هو t_s . ومن ثم يستطيع أن يحسب المسافة إلى النجم على أنها $x = vt$ ويصل إلى :

$$d_s = vt_s$$

حيث يشير الحرف s إلى القياسات التى تمت فى مناط إسناد ساكن بالنسبة لسـفينة الفضـاء وبإجراء حسابات مماثلة لرحلة العودة فإنه يجد أن الرحلة بأكملـها قد قطعت مسافة $2d_s$ فى زمن مقداره $2t_s$.

وعلى ذلك يصبح لدينا المعادلتان التاليتان وهما صحيحتان دون أدنـى شك بالنسـبة للراصدين اللذين صاغاهما :

$$2d_e = v(2t_e) \qquad , \qquad 2d_s = v(2t_s)$$

ولكننا نعرف أن تمديد الزمن يؤثر على ساعة سفينة الفضاء ، بحيث أننا لو قارناها بالساعة الأرضية عند عودة السفينة إلى الأرض فسنجد أن :

$$t_s = \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\cdot t_e$$

أى أن ساعة سفينة الفضاء قد طقطقت الزمن بشكل أبطأ من الساعة الأرضيـة .

وبالتعويض من هذه القيمة للزمن t_s فى معادلة d_s نجد أن :

$$d_s = v\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\cdot t_e$$

على أن $d_e = vt_e$ ولذلك فإن $t_e = d_e/v$. وإذا استخدمنا هذه القيمة للزمن t_e فإن :

$$d_s = \sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\, d_e$$

وبعبارة أخرى فإن المسافة بين الأرض والنجم . إذا قيست بساعة الرجل فى سفينته الفضائية ستكون أقصر من المسافة التى يقيسها الفلكيون وهم على سطح الأرض . فمن الظاهر إنه إذا كنت تتحرك بالنسبة لنقطتين بينهما مسافة ثابتة ، فإن المسافة بين النقطتين ستبدو أقصر مما لو كنت ساكنًا بالنسبة لهما . والنسبة بين المسافتين هى معامل النسبية ، $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

لقد وجد أينشتين أن هذه نتيجة عامة ، ويمكننا تلخيصها كما يلى :

لو أن جسمًا وراصدًا كانا فى حركة نسبية بسرعة مقدارها v ، فإن الراصد سيقيس طول الجسم المتحرك كما لو كان قد انكمش على طول خط الحركة بمعامل مقداره $\sqrt{1-(v/c)^2}$.

يلاحظ أن الانكماش لا يحدث سوى باتجاه خط الحركة ، ولا يلاحظ أى انكماش عموديًا على خط الحركة . ويسمى طول جسم ما إذا قيس بواسطة راصد ساكن بالنسبة للجسم **الطول الصحيح** .

نستطيع الآن أن نوفق بين قياسات الراصدين على سطح الأرض فى المثال 1-26 وتلك التى يقوم بها من يسافر داخل سفينة الفضاء . ومعامل انكماش الطول هو نفسه معامل استطالة - أو تمديد - الزمن وهو 0.045 . ويمكننا اعتبار المسافة بين الأرض والنجم ألفا سنتورى على أنها طريق طويلة جدًا تتحرك مارة بسفينة الفضاء . وحين تقاس هذه الطريق من فوق الأرض فإن طولها يكون هو الطول الصحيح ، ولكن حين تقاس من داخل سفينة الفضاء فإن طولها سينكمش إلى المقدار :

$d_{\text{سفينة}} = 0.045\, d_{\text{أرض}} = (0.045)$ (4.3 سنة ضوئية)

$=$ 0.19 سنة ضوئية

يرى ركاب السفينة أنفسهم وكأنهم ينطلقون عبر هذا الطريق بسرعة مقدارها $v = 0.999\, c$. ولذلك فهم يستنتجون دون أدنى دهشة أن الرحلة ذهابًا وإيابًا ستستغرق منهم :

$t_{\text{سفينة}} = 2$ (0.194 سنة ضوئية) / (0.999 سنة ضوئية / سنة) $=$ 0.39 سنة

مثال توضيحى 2-26

يمسك رائد فضاء بساق طولها متر واحد فى يده أثناء سفره داخل سفينة فضاء تنطلق بسرعة كبيرة . ماذا يلاحظ ذلك الرائد فيما يتعلق بطول الساق . إذا أدارها من الموضع الذى كانت توازى فيه اتجاه الحركة إلى وضع متعامد معه ؟

استدلال منطقى : لن يلاحظ أى تغير فى طول الساق . إن انكماش الطول يتعلق

بالأجسام التى تتحرك بسرعات كبيرة بالنسبة للراصد ؛ فى حين أن الساق تعتبر ساكنة بالنسبة لرائد الفضاء . ■ .

26-6 العلاقة النسبوية بين الكتلة والطاقة

لقد ذكرنا فى القسم 3-12 أن نظرية النسبية لأينشتين تتنبأ بأن كتلة جسم ما تعتمد على مقدار سرعته ، وأن هذا التأثير يصبح ملحوظًا جدًا عندما تقترب تلك السرعة من سرعة الضوء c ، وبما أننا لم نكن حينئذ قد تعرفنا على فروض النسبية لشرح هذا التأثير فسنفعل ذلك الآن .

تنص هذه الفروض ـ كما رأينا فى القسم 26-2 ، على أنه لا يمكن تعجيل جسم إلى سرعات تزيد على سرعة الضوء . ويصطدم هذا القيد المفروض على السرعة مع قوانين نيوتن للحركة . كما أشرنا فى الفصل الثالث . فقوانين نيوتن تتنبأ بأن سرعة جسم ما قد تستمر فى الزيادة دون قيود طالما استمرت القوة المحصلة فى التأثير على الجسم :

$$v = v_0 + at = v_0 + \frac{F}{m}t$$

حيث اعتبرت كتلة الجسم m ثابتة . وهذه المعادلة تخرق حد السرعة الذى يفترضه أينشتين ، لأنه بعد فترة زمنية كافية سيصبح المقدار $v_0 + (F/m)t$ أكبر من c . وقد قرر أينشتين أنه لكى يظل التوافق مع فروض النسبية ومع قانون بقاء كمية التحرك ؛ فإن كتلة الجسم لابد أن تتزايد بزيادة سرعته . وبهذه الطريقة يقل المقدار F/m مع زيادة t ، بحيث تقترب v من القيمة الحدية للسرعة وهى c عندما يصبح t كبيرًا جدًا . وقد أدت فروض أينشتين به إلى استنتاج أن العلاقة بين الكتلة والسرعة لابد أن تكون على الصورة :

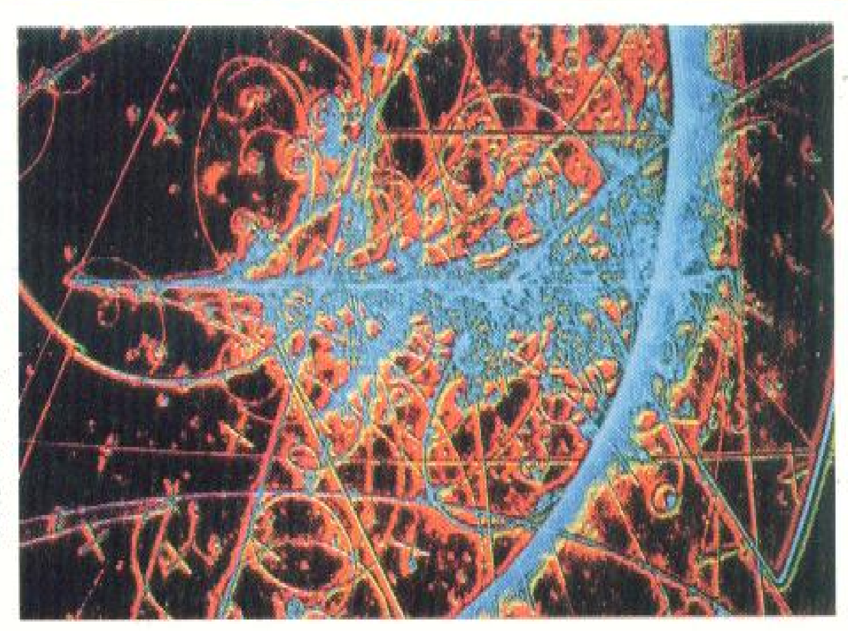
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (26\text{-}1)$$

حيث يطلق على m_0 **كتلة السكون** ، وهى تساوى الكتلة التى استخدمناها فى قوانين نيوتن . أما الكتلة التى تعتمد قيمتها على السرعة فتسمى **الكتلة الظاهرية** للجسم .

ويبين الشكل 3-22 المنحنى البيانى الذى يمثل تغير الكتلة مع السرعة ، ويتضح منه أن الكتلة الظاهرية m تظل قريبة من قيمة كتلة السكون m_0 طالما كان المقدار v/c أقل من بضعة أعشار . وكلما اقتربت v من c ، أى كلما $v/c \to 1$ فإن $\sqrt{1 - v^2/c^2} \to \sqrt{1-1} = 0$ وهو ما يجعل الكتلة الظاهرية تقترب من ما لا نهاية :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \infty$$

وتغير الكتلة مع السرعة ، يمكن أن يستخدم لتبرير حقيقة أنه لا يمكن أن يعجل أى جسم إلى سرعات تزيد على سرعة الضوء ، فالكتلة اللانهائية تستلزم قوة لانهائية



يمكننا دراسة شحنة وطاقة الجسيمات النووية من خلال الآثار التى تتركها وهى تمر من خلال غرفة فقاعية والتى تشبه المبينة هنا . وتكون تلك الآثار ـ بالنسبة للجسيمات المشحونة ـ منحنية بسبب وجود مجال مغناطيسى مستعرض بالنسبة لاتجاه الحركة . وكثيرًا ما تظهر آثار منحنية فى اتجاهين متضادين لزوج من الإلكترون والبوزيترون وهما جسيمان مشحونان بشحنتين متضادتين ولهما كتلتان متساويتان ويولد هذان الجسيمان من شعاع جاما منفرد . والطاقة الكلية للزوج المحسوبة مساوية لطاقة شعاع جاما وذلك طبقًا لتنبؤات أينشتين فى المعادلة $E = mc^2$.

لتعجيلها . وحيث أن القوى اللانهائية غير متاحة عملية ، فإن الواضح أن جسمًا سرعته $v \to c$ لا يمكن أن يُعجل إلى سرعة الضوء ، وهى السرعة التى تكون الكتلة عندها لا نهائية .

إن القوة التى تعمل على تعجيل (تسارع) جسم ما ، تزود ذلك الجسم بالطاقة . ونعلم أنه عند السرعات المنخفضة يكون الشغل المبذول من جانب القوة الخالصة المطبقة مساويًا للزيادة فى طاقة حركة الجسم ما لم تكن هناك تغيرات ملموسة فى طاقة الوضع والشغل نتيجة الاحتكاك . ويظل هذا الأمر صحيحًا عند سرعات قريبة من c ، وإن كانت طاقة حركة الجسم عندئذ ليست مجرد $\frac{1}{2}m_0v^2$ ، كما وأنها ليست كما قد يخمن البعض $\frac{1}{2}mv^2$. إذ إنها بدلا من ذلك ستكون :

$$K.E = (m - m_0)(c^2) \tag{26-2}$$

وتختصر* المعادلة (2-26) ، عندما $v \ll c$ ، إلى المعادلة الكلاسيكية لطاقة الحركة ، $KE = \frac{1}{2}m_0v^2$.

وعندما لا تكون على علم بسرعة الجسم ولكنك تعرف مقدار الطاقة التى أعطيت لذلك الجسم ، فإن هناك وسيلة مفيدة جدًا لتحديد ما إذا كان عليك أن تستخدم المعادلة (2-26) أو $\frac{1}{2}m_0v^2$ لحساب طاقة حركة الجسم . عليك أولاً أن تحسب طاقة كتلة

---

* لإثبات هذا ، يمكننا الرجوع إلى الحقيقة الرياضية أنه إذا كانت $x \ll 1$ ، فإن المقدار $1/\sqrt{1-x} \cong 1+\frac{1}{2}x$. ومن ثم ، إذا سمينا المقدار $(v/c)^2$ بالرمز x . فى حالة $(v/c)^2 \ll 1$ ،

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \cong m_0\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

وعندئذ تصبح المعادلة (2-26) على الصورة :

$$KE = mc^2 - m_0c^2 \cong m_0c^2 + \frac{m_0}{2}\frac{v^2}{c^2}c^2 - m_0c^2 = \frac{1}{2}m_0v^2$$

سكون الجسم m_0c^2 ، ثم تقارنها بمقدار الطاقة التى أعطيت للجسم . فإذا كانت تلك الطاقة أكبر من واحد أو اثنين من عشرة أجزاء من طاقة كتلة سكون الجسم فعندئذ يقال أن الجسم « نسبوى » وعليك استخدام المعادلة (2–26) . أما إذا كانت الطاقة المعطاة للجسم أقل من ذلك ، فإن الجسم يكون عندئذ « كلاسيكى » وتكون المعادلة $KE = \frac{1}{2}m_0v^2$ عندئذ كافية . (وكما هو الحال دائمًا ، فإن هذا يعتمد على الدقة التى تحتاجها فى حساباتك) .

تنص المعادلة (2–26) على أن طاقة الحركة هى الفرق بين الحدين mc^2 و m_0c^2 وعلاوة على ذلك فهى تقتضى أن يظل الجسم محتويًا فى حالة السكون (KE = 0) على بعض الطاقة الأساسية ، m_0c^2 ، وهى ما نطلق عليه **طاقة كتلة السكون** . وقد تمكن أينشتين من إثبات أن علاقة شبيهة بالمعادلة (2–26) يمكن أن تنطبق على كل أنواع الطاقة . وقد أثبت أنه **بالنسبة لأى تغير فى طاقة جسم ما ، فإن هناك تغيرًا مناظرًا فى كتلة الجسم** ، ويعطى بالمعادلة :

$$\Delta E = \Delta mc^2 \qquad (26\text{-}3)$$

(وغالبًا ما تكتب هذه العلاقة على صورة $E = mc^2$ وهى من أشهر معادلات أينشتين) .
يلاحظ أن المعادلة (3–26) يمكن أن تكتب أيضًا على الصورة $\Delta m = \Delta E/c^2$. وحيث أن c^2 مقدار هائل ، فإن الأمر يقتضى أن التغيرات الملموسة فى الكتلة لابد لها من تغيرات ضخمة فى الطاقة . والتغيرات التى نتعامل معها فى عالمنا اليومى « الكلاسيكى » فى مجال التفاعلات الكيميائية أو التغيرات الصغيرة فى طاقة الحركة أو طاقة الوضع أصغر من أن تتسبب فى تغيرات ملموسة فى الكتلة . أما عندما نرصد تغيرات فى الطاقة عند حدوث تفاعلات نووية فقط ، فإن تغير الكتلة يصبح واضحًا بشكل مؤثر كما سنرى .

مثال 2-26

تتسارع الإلكترونات (تعجّل) بشكل روتينى فى المعامل خلال جهد كهربى يصل إلى مليون فولت ، فتكتسب عندئذ طاقة حركة مقدارها 1 MeV . ما هى سرعة هذه الإلكترونات وما كتلتها التى تقيس فى مناط إسنادنا ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : كيف أتعرف على العلاقة الصحيحة بين KE والسرعة حتى أستعملها هنا ؟
الإجابة : عليك أن تحسب أولاً طاقة كتلة السكون للإلكترون . فحيث أن $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg فإن $m_0c^2 = 8.2 \times 10^{-14}$ J = 0.511 MeV . وحيث أن KE = 1 MeV فإن هذه الإلكترونات نسبوية بالتأكيد وعليك استعمال المعادلة (2–26) لحساب طاقة الحركة لها .
سؤال : كيف تدخل السرعة فى المعادلة (2–26) ؟

الإجابة : تعتمد الكتلة على السرعة حسب المعادلة (1-26) وإذا وضعنا قيمة m من المعادلة (1-26) في المعادلة (2-26) سنحصل على معادلة للمقدار v/c :

$$\text{KE} = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-1\right)$$

الحل والمناقشة : تعطينا المعادلة السابقة ما يلى :

$$\frac{\text{KE}}{m_0c^2}+1 = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

وبتربيع الطرفين وأخذ المقلوب ، نجد :

$$1-\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{(\text{KE}/m_0c^2+1)^2} = \frac{1}{8.74} = 0.114$$

ومن هنا نجد أن $(v^2/c^2) = 0.886$ أو $v/c = 0.941$. أى أن الإلكترونات تتحرك بسرعة تصل إلى 94 بالمائة من سرعة الضوء ، وكتلة هذه الإلكترونات تقارب ثلاثة أمثال كتلة السكون :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{0.114}} = 2.96\ m_0$$

تمرين : عين السرعة المتوقعة كلاسيكيًا لهذه الإلكترونات .

الإجابة : 5.93×10^8 m/s $\approx 2c$!

مثال توضيحى 3-26

الطاقة الكيميائية فى تفاحة تزن 100 g هى 100 kcal تقريبًا (ويتغاضى علماء التغذية عن اللازمة kilo ويسمون هذه الوحدة سعرًا Calory) . وقد عرفنا من دراستنا أن 1 cal من الحرارة يكافئ 4.18 J من الطاقة ، أى أن التفاحة بها 420 kJ من الطاقة المتاحة . قارن بين هذه الطاقة والطاقة الناتجة من تحويل كل كتلة التفاحة إلى طاقة .

استدلال منطقى : طبقًا لمعادلة الكتلة والطاقة فإن :

$$\text{الطاقة} = \Delta mc^2$$

وفى هذه الحالة $\Delta m = 0.10$ kg و $c = 3 \times 10^8$ m/s مما يعطى ،

$$\text{الطاقة} = 9 \times 10^{15}\ \text{J}$$

ومن هنا نرى أننا عندما نأكل تفاحة فإننا لا نحصل إلا على كسر صغير جدًا (5×10^{-11}) من طاقتها الإجمالية . ■

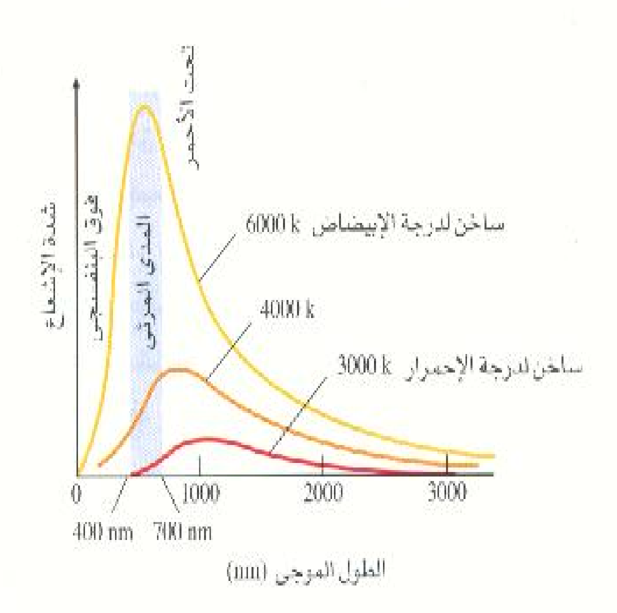
الجزء الثانى : الفوتونات

26-7 اكتشاف بلانك

فى عام 1900 وقبل أن يقدم أينشتين نظريته للنسبية بخمسة أعوام قام بلانك (1858 – 1947) باكتشاف بدا وكأنه أقل من أن يهز الدنيا فى ذلك الوقت ، ولكننا نعتبره اليوم كأول ما ظهر من صندوق « باندورا » الملئ بالعجائب . لقد انخرط بلانك مع آخرين فى محاولة لتفسير الإشعاع المنبعث من أجسام ساخنة غير عاكسة ، يطلق عليها **الأجسام السوداء** (القسم 11-11) . وقد أشارت القياسات الدقيقة لشدة الإشعاع المنبعث من الأجسام الساخنة فى المدى المرئى وتحت الأحمر وفوق البنفسجى أن تلك الشدة تتغير مع الطول الموجى طبقًا لما هو ممثل فى الشكل 6–26 . وكما هو واضح فإن كسرًا صغيرًا فقط من الإشعاع المنبعث يشتمل على أطوال موجية فى المدى المرئى من الطيف ، وأن أغلب الإشعاع فى مدى الأشعة تحت الحمراء . وعلاوة على ذلك ، فإن قمة الإشعاع تتزحزح من المدى تحت الأحمر إلى المدى المرئى مع ارتفاع درجات الحرارة ويتفق هذا مع خبراتنا بأن الجسم الساخن إلى درجة الابيضاض يكون أكثر سخونة من الساخن إلى درجة الإحمرار .

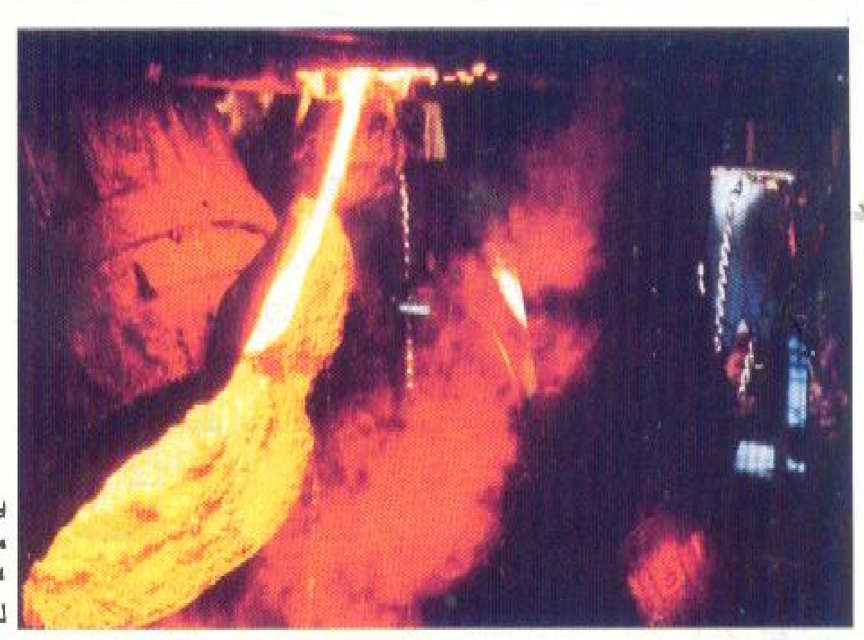
ولكى نفسر هذه المنحنيات ، علينا أن نتساءل عن نوع هوائيات الإرسال التى تستطيع بث موجات كهرومغناطيسية من الجسم الساخن . وحيث أن الأطوال الموجية المعنية قصيرة جدًا ؛ فإن تردد الشحنات المتذبذبة لابد أن يكون كبيرًا جدًا . فعند طول موجى مقداره 1000 nm مثلاً يكون لدينا ؛

$$\text{التردد} = f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}\ \text{m/s}}{10^{-6}\ \text{m}} = 3\times10^{14}\ \text{Hz}$$



شكل 6–26:
إشعاع الجسم الأسود . درجات الحرارة المذكورة بغرض المقارنة تناظر ما يلى : 6000 k (سطح الشمس) ، 4000 k (قوس كربونى) ، 3000 k (مصباح تنجستين ساخن جدًا) .

لاحظ مدى ارتفاع هذا التردد . إن الشحنات قادرة على التذبذب بهذه السرعة فى هوائيات ذات أبعاد ذرية فحسب . ونتيجة لذلك فلنا أن نتوقع انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسى من الشحنات المهتزة داخل الذرات والجزيئات المكونة للجسم الساخن .



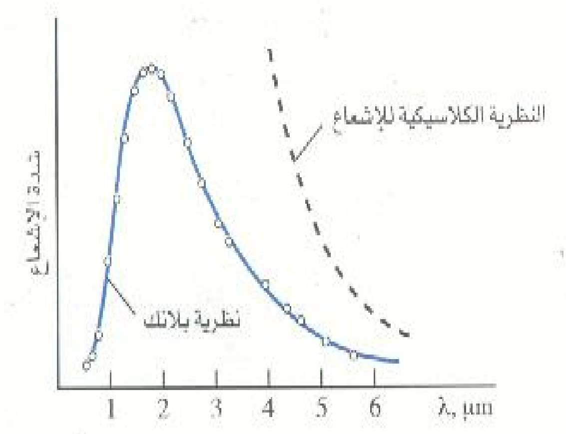
يشع الصلب المنصهر الطاقة بمعدلات مرتفعة ، مما يشكل مثالاً حيًا على قانون T^4 الذى يسمى قانون ستيفان ـ بولتزمان للإشعاع .

ونستطيع افتراض العديد من النماذج التى تمثل هذه المتذبذبات الذرية أو الجزيئية فلو كان الجسم مكونًا ، مثلاً ، من جزيئات قطبية ثنائية الذرات ، فإن الجزئ المهتز يمكن تمثيله بالصورة الموضحة فى الشكل 7-26 ، حيث ترتبط الذرتان معًا بقوة تشبه الياى ، وحيث أن الجزئ قطبى ، فإن ذرتيه تحملان شحنات تهتز على هوائى وتبعث من ثم إشعاعًا كهرومغناطيسيًا تردده f_0 ، وهو التردد الطبيعى لذبذبة نظام الياى (الزنبرك) الجزيئى . إن هذا ـ على الأقل ـ هو التصور الذى اهتدى إليه بلانك ومعاصروه .

على أنه قد اتضح أن جميع نظريات الإشعاع المبنية على هذا النموذج ، قد فشلت فى وصف إشعاع الجسم الأسود على نحو صحيح ؛ فكانت النظريات قادرة على التنبؤ بالمنحنيات الموضحة فى الشكل 6-26 عند الأطوال الموجية الطويلة فحسب ، فى حين أنها أعطت تنبؤات خاطئة تمامًا عند الأطوال الموجية القصيرة . ويعود الفضل إلى بلانك الذى اكتشف كيفية تعديل النظرية حتى تتفق مع التجربة . وإذا كان التعديل الذى أدخله مفهومًا بسهولة إلا أن هناك صعوبة فى تبريره . والحق أن المبرر الوحيد هو أن التعديل يفضى إلى الإجابة الصحيحة . وسنتناول الآن ما ذهب إليه للحصول على اتفاق بين النظرية والتجربة .

إن سعة اهتزاز نظام متذبذب ، كما نعلم ، تعتمد على طاقة ذلك النظام وعلى الرغم من أن تردد الاهتزازات هو f_0 دائمًا ، إلا أن سعة الاهتزازة تتزايد عند زيادة الطاقة . وطبقًا لما كان سائدًا من مفاهيم فى زمن بلانك ، فإن المهتز قد يكون لديه أى قدر من الطاقة فى مدى متصل من القيم .

شكل 7-26:
لقد كان الاعتقاد السائد قبل عام 1900 ، أن الجزيئات القطبية تتصرف مثل هوائى الراديو وتبعث موجات كهرومغناطيسية عندما تهتز .



شكل 8-26:
طيف إشعاع جسم أسود عند درجة حرارة مقدارها $T = 1600\ k$. والدوائر تمثل البيانات المعملية ، أما النظرية الكلاسيكية للإشعاع (ويمثلها الخط المتقطع) فهي تقترب من البيانات المعملية عند الأطوال الموجية الطويلة ، وتفشل تمامًا في تفسير الانخفاض الذي يتم عند الأطوال الموجية القصيرة . وتتفق نظرية بلانك (المنحنى المتصل) التي تفترض وجود طاقات مكماة للجزيئات المهتزة ، مع السلوك المشاهد عملية ، بشكل ملحوظ .

ولما كان هذا الفرض يؤدي إلى تضارب مع التجربة ، فإن بلانك أثار سؤالاً بدأه بقوله « ماذا لو ؟ » . ثم قرر دون أدنى تبرير ، أن يعتبر أن المهتزات يمكنها أن تتخذ قيمًا محددة فقط للطاقة :

يستطيع مهتز تردده f_0 أن يتذبذب بحيث تكون طاقاته hf_0 ، $2hf_0$ ، $3hf_0$ ، . . . . ، nhf_0 ، فقط . وأية قيم أخرى للطاقة لن تكون ممكنة .

والمقدار h وهو ثابت التناسب ، قد أصبح معروفًا باسم **ثابت بلانك** . وقد وجد بلانك أنه بهذا الفرض قادر على الوصول إلى اتفاق ممتاز مع الطيف الملاحظ عمليًا لإشعاع الأجسام الساخنة (بالشكل 8-26) عندما تكون قيمة h هي :

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J.s}$$

لقد كان فرض بلانك في الحقيقة مدهشًا . إذ إنه كان يعني **تكمية** الطاقات المسموح للمهتز أن يتخذها . ولم يظهر إلى الوجود قبل بلانك مفهوم أن الطاقة تأتي على هيئة « قطع » أو **كمات** quanta بدلاً من أن يكون من الممكن تناولها بأية مقدار نشاء ، بل ولم تكن هناك أية خبرات في التعامل مع نظم ميكانيكية من شأنها إثارة أية أسباب للشك في هذا .

ولكي ندرك السبب في أن تكمية الطاقة لا تدرك بسهولة في المعمل علينا أن نفحص اهتزاز البندول . إن طاقته تعطى بالكمية mgH ، حيث H هي أعلى وضع رأسي له . . وتنص فكرة بلانك على أن طاقات البندول يمكن أن توجد فقط على هيئة مضاعفات صحيحة للكم (الكمة) الأساسي hf_0 . ولكي ندرك معنى هذا سنعتبر بندولاً تردده الطبيعي f_0 مقداره 1 Hz ، وأن كتلة الثقل المتصل به هي 100 g . والارتفاعات التي يستطيع البندول الوصول إليها هي :

$$H_1 = \frac{hf_0}{mg} = \frac{(6.6\times10^{-34}\ \mathrm{J.s})(1\ \mathrm{s}^{-1})}{(0.10\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{ms}^{-2})} = 6.7\times10^{-34}\ \mathrm{m}$$

أو $H_2 = 2H_1 = 13\times10^{-34}\ \mathrm{m}$ أو $H_3 = 3H_1 = 20\times10^{-34}\ \mathrm{m}$ وهلم جرًا ، أي أنه لا يمكن أن نجد ارتفاعًا أقصى للاهتزازة ذا قيمة بين القيم المذكورة .

يلاحظ أن الفرق بين ارتفاعين متعاقبين مسموح بهما للاهتزازة هو نحو 10^{-33} m

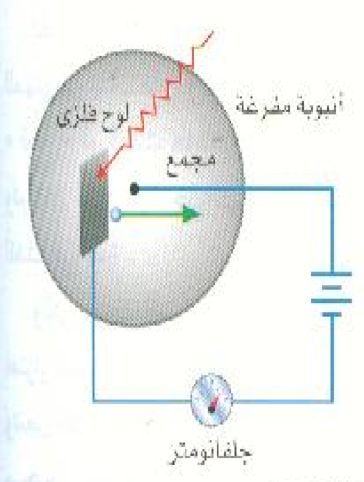
فحسب ، حسبما تنبأ بلانك . وفى المقابل ، فإن قطر ذرة ما نحو 10^{-10} m وقطر النواة الذرية نحو 10^{-14} m. والفجوة بين الارتفاعات المسموح بها أصغر كثيرًا جدًا من أن تقاس والواقع أن هذه هى حالة كل أمثلة الاهتزازات الشائع التعامل معها فى المعمل ، ولذلك لا نستطيع أن نشاهد تأثيرات الطاقات المكماة عندما نتعامل مع نظم مهتزة ذات أبعاد كبيرة (أبعاد معملية) .

وهكذا واجه بلانك موقفًا مربكًا ، فقد كان يستطيع الوصول إلى نظرية مناسبة تفسر إشعاع الجسم الساخن شريطة أن يكون راغبًا فى تبنى الفرض المذكور سابقًا . وقد اتضح أن الاختبار المعملى لهذه النظرية ، بالنسبة لنظم متذبذبة أخرى ، مستحيل تمامًا . ولذلك اعتبرها بلانك ومعاصروه ـ فى ذلك الوقت ـ نتيجة مثيرة ، ولكن صلاحيتها مشكوك فيها . على أننا سوف نرى لاحقًا أنها نظرية صحيحة وعلى أقصى قدر من الأهمية .

26-8 كيف استخدم أينشتين مفهوم بلانك ؟

لم تمض أكثر من خمس سنوات على اكتشاف بلانك ، حتى أثبت أينشتين أن هناك ظاهرة طبيعية أخرى تنطوى على نفس ثابت بلانك : h .فحين كان عاكفًا على تفسير نتائج تجربة أجراها هينريش هيرتز لأول مرة ، قام أينشتين بافتراض أن الضوء يتمتع بخواص الجسيمات مثلما أن له خواص الموجات . وقد أصبح فرض أينشتين ـ الذى تحقق فيما بعد ـ جزءًا متممًا للفيزياء الحديثة .

ثم اكتشف هيرتز فى عام 1887 (وهو نفسه الذى تمكن من توليد واكتشاف أول موجات لاسلكية) أن الضوء قادر على اقتلاع إلكترونات من لوح فلزى وقد أصبحنا نعرف الآن أن ما حدث هو ظاهرة عامة : **تستطيع الطاقة الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية القصيرة ، إذا أسقطت على جسم صلب ، أن تجعل هذا الجسم يبعث إلكترونات من سطحه** . وسميت هذه الظاهرة **بالأثر الكهروضوئى** كما سميت الإلكترونات المنبعثة **بالإلكترونات الضوئية** .



شكل 9-26:
عندما يرتطم الضوء باللوح الفلزى ، فإن الإلكترونات تنبعث منه .

ويوضح الشكل 9-26 تجربة لمشاهدة الأثر الكهروضوئى ، حيث يتم وضع لوح فلزى داخل أنبوبة تفريغ مسدودة بإحكام ، ويتصل بهذا اللوح سلك صغير يسمى **المجمِّع** . (ويطلق على هذه المجموعة خلية ضوئية) . ثم وصلت هذه العناصر فى دائرة تضم بطارية وجلفانومتر كما فى الشكل . وعندما تكون الأنبوبة مغطاة بحيث لا ينفذ إليها أى ضوء ، فإن التيار المار عبر الجلفانومتر يكون صفرًا ؛ لأن ذلك الجزء من الدائرة فيما بين اللوح والمجمع داخل الأنبوبة يفتقر إلى الاتصال لأن الحيز المفرغ ذو مقاومة لانهائية بالضرورة .

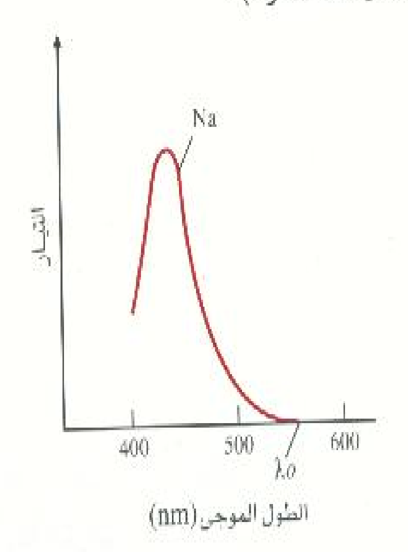
عند سقوط ضوء ذى طول موجى قصير على اللوح ، فإن مؤشر الجلفانومتر يأخذ فى الانحراف ، حيث يدل اتجاه مرور التيار على أن الإلكترونات تغادر اللوح الفلزى متجهة نحو المجمِّع . وقد يخمن البعض أن الضوء قد قام بتسخين اللوح ، وأنه حين صار ساخنًا بدرجة كافية لدرجة أن الإلكترونات ذات الطاقة الحرارية المرتفعة قد تمكنت من الهروب منه على أن الحقيقة ليست كذلك ، فقد أوضحت التجارب الدقيقة

أنه مهما كان الضوء ضعيفًا ، ومهما كان اللوح الفلزى ضخمًا ، فإن تيارًا من الإلكترونات سينبعث من اللوح فى نفس اللحظة التى يسقط فيها الضوء عليه . أى أنها ليست بحاجة لأى تسخين .



يعتبر مقياس التعرض للضوء والآلة الحاسبة ، أمثلة لأجهزة يعتمد عملها على الأثر الكهروضوئى .

ثم لوحظ بعد ذلك ، إنه بالنسبة لمصدر ضوئى معين ، يتناسب عدد الإلكترونات المنبعثة من لوح فلزى مع شدة الضوء (أى مع الطاقة الصادرة لوحدة المساحات فى الثانية) وعندما يكون جهد البطارية كبيرًا بما يكفى لاجتذاب كل الإلكترونات المنبعثة نحو المجمع ، فإن التيار المار بالجلفانومتر سيتناسب طرديًا مع شدة الضوء . (ولهذا السبب بالذات تستخدم الخلية الكهروضوئية لقياس شدة الضوء) .



شكل 10-26:
يتغير التيار المار فى الدائرة المذكورة فى الشكل 9-26 مع الطول الموجى . كما هو موضح بالنسبة لفلز الصوديوم . ما هو معنى قيمة λ_0 المشار إليها بالشكل ؟

يوضح الشكل 10-26 سمة أكثر إبهارًا لهذه الظاهرة . افترض أن الطول الموجى للحزمة الضوئية قابل للتغيير ، بينما تظل شدة الضوء ثابتة ، وأن التيار المار فى الدائرة المبينة فى الشكل 9-26 يمكن تسجيله عند سقوط حزمة ضوئية ذات طول موجى متغير

على لوح الخلية الكهروضوئية . لقد وجد أن ذلك التيار يتغير مع تغير الطول الموجي بالصورة المبينة في الشكل 10-26 . وهناك منحنيات مماثلة لألواح مصنوعة من مواد أخرى ، وإن كانت قيم λ_0 تختلف باختلاف المواد ، و λ_0 هو الطول الموجي الذى يصبح التيار المار في الدائرة عنده صفرًا .

إن أكثر سمات هذه المنحنيات إبهارًا بالفعل ، هي أنه لن تنبعث إلكترونات على الإطلاق إذا زاد الطول الموجي للضوء عن λ_0 وهو ما يطلق عليه **الطول الموجي الكهروضوئي المُشْرِفي** فمهما بلغت شدة الضوء فلن تنبعث إلكترونات إذا كان الطول الموجي لذلك الضوء أطول ولو بقدر طفيف عن λ_0 . كما أنه مهما كان الضوء ضعيفًا فإن الإلكترونات ستنبعث إذا كان الطول الموجي أقصر من λ_0 ، وبمجرد أن يسقط الضوء على اللوح . وتعتمد هذه القيمة الخاصة للطول الموجي λ_0 والتي يبدأ عندها انبعاث الإلكترونات على المادة التي صنع منها اللوح .

وهناك تجربة أخرى ، تتضمن نفس الدائرة المبينة في الشكل 9-26 ، ويمكن الحصول منها على المزيد من البيانات المهمة ؛ حيث توجه حزمة ضوئية ذات طول موجي معلوم وشدة معروفة نحو اللوح ، ثم تقاس طاقة أسرع الإلكترونات المنبعثة من اللوح . ويتم هذا باستخدام مصدر متغير الجهد بدلاً من البطارية على أن يكون قطباه معكوسين ولأن المجمع قد أصبح الآن سالبًا بدلاً من أن يكون موجبًا ؛ فهو يتنافر مع الإلكترونات الضوئية ؛ مما يجعل التيار المار في الدائرة يهبط إلى الصفر عندما يصل الجهد العكسي إلى قيمة كبيرة بما يكفي . وعند الجهد V_0 (**جهد الإيقاف**) يكون التيار صفرًا ، وحينئذ أيضًا يكون الشغل الذى يبذله أسرع الإلكترونات الضوئية عندما ينتقل من اللوح إلى المجمع هو eV_0 وذلك لأن الإلكترون يتحرك عبر فرق للجهد مقدارها V_0 . ولابد لهذا الشغل أن يكون مساويًا لطاقة حزمة أكثر الإلكترونات الضوئية طاقة . وعلى ذلك نستطيع تعيين طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية ، بواسطة قياس جهد الإيقاف V_0 :

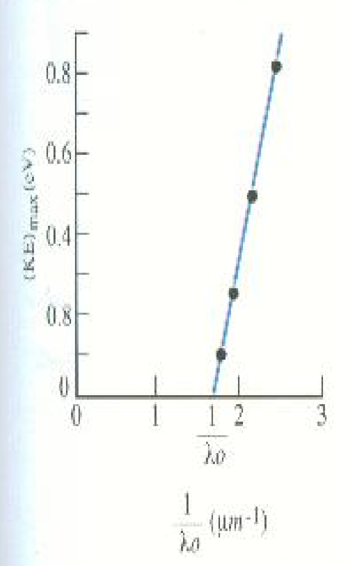
$$(\mathrm{KE})_{\max} = eV_0$$

وتتبدى لنا نتيجة مهمة عندما نقيس V_0 المناظرة لأطوال موجية ساقطة مختلفة فعندما نرسم العلاقة بين $(\mathrm{KE})_{\max}$ مع $1/\lambda$ ، تكون النتيجة خطًا مستقيمًا ، كما هو موضح بالشكل 11-26 . أضف إلى ذلك ، أن قيمة λ التي تصبح عندها $(\mathrm{KE})_{\max}$ صفرًا هي الطول الموجي المشرفي λ_0 . وتصبح معادلة الخط المستقيم $\lambda = mx + b$ ، في هذه الحالة :

$$(\mathrm{KE})_{\max} = \frac{A}{\lambda} - B \qquad (26\text{-}4)$$

حيث تحل $1/\lambda$ محل x ويحل A محل m ، ويحل الجزء المقطوع $-B$ محل b . ويختلف الثابت B من مادة لأخرى ، أما A وهو يمثل ميل الخط المستقيم ، فيكون ثابتًا لجميع المواد وتصل قيمته إلى 2.0×10^{-25} J.m .

ولقد بذلت محاولات عديدة لتفسير كل هذه المشاهدات بدلالة الطبيعة الموجية للضوء ، إلا إنها قد باءت جميعها بالفشل ، حيث قامت عقبتان أساسيتان أمام أى تفسير موجي .



شكل 11-26:
تتناسب طاقة الإلكترون عكسيًا مع الطول الموجي . ويمثل هذا الخط البياني الخاص فلز الصوديوم .

1 كيف يمكن تصور موجات تؤدى إلى وجود طول موجى مشرفى ؟ إن الضوء الذى طوله الموجى λ أقل قليلاً من λ_0 ، لن يختلف بشكل ملموس عن الضوء الذى طوله الموجى λ أكبر قليلاً من λ_0 . ومع ذلك فأطوال الموجات الأقصر قليلاً من λ_0 تجعل الإلكترونات تنبعث ، فى حين أن تلك الأطول قليلاً من λ_0 لا تفعل ذلك .

2 كيف يتسنى حتى لأضعف حزمة ضوء ممكنة أن تجعل الإلكترونات تنبعث بمجرد تسليط الضوء على الفلز ؟ إن طاقة الضوء عندئذ ستبدو كما لو تركزت عند إلكترون لحظيًا وجعلته يفلت من أسر الجسم الصلب .

وهكذا بات واضحًا أن توجهًا جديدًا لابد من اتباعه لتفسير الأثر الكهروضوئى . وقد خطا أينشتين هذه الخطوة الجزئية الخلاقة ، وأمسك بأفكار بلانك حول طاقات المهتز الخاصة . وقد فكر أينشتين فى الأمر ووجد أنه لو كان على المهتزات الذرية داخل جسم ساخن أن تبعث إشعاعًا بالطريقة التى تصورها بلانك ، فإن الطاقة لابد أن تنبعث على صورة دفقات أو حزم . وحيث أن الموجات الكهرومغناطيسية تحمل طاقة ، فإن المهتز الذى يبعث ضوءًا ، مثلاً ، لابد أن يرسل طاقة بالطبع . على أنه إذا كان المهتز يستطيع اتخاذ قيم محددة معينة للطاقة فحسب ، لذا فهو لن يلقى بالطاقة بشكل مستمر . إذ إن عليه أن يقذف بالطاقة على شكل دفقات مقدارها hf_0 لأنه يمثل التباعد بين قيم الطاقة المسموح بها للمهتز .

ولكى نكون محددين ، افترض أن طاقة المهتز $37hf_0$ ، فإذا فقد قدرًا من الطاقة عندما يبعث بإشعاع ما ، فإن طاقته ستصبح $36hf_0$ وليس أى شىء آخر فيما بين هاتين القيمتين ، وذلك طبعًا لأن طاقات المهتز مكماة . ولكنه إذ يفعل ذلك ، فإنه يكون قد تخلص من نبضة ضوء أو إشعاع آخر طاقتها hf_0 . ويطلق على نبضة الطاقة الكهرومغناطيسية هذه **كمة ضوء أو فوتون** . وهكذا يتضح لنا أن هناك بعض التبرير للاعتقاد بأن حزمة الضوء تتكون من سلسلة من حزم الطاقة التى تسمى فوتونات . وتعمل هذه الفوتونات كجسيمات للضوء تنتقل بسرعة مقدارها c ، حاملة طاقة مقدارها hf .

وهكذا وضع أينشتين فرضه المتعلق بطبيعة الضوء :

تتكون حزمة الضوء ذى الطول الموجى λ (والتردد $f = c/\lambda$) من تيار من الفوتونات . ويحمل كل فوتون طاقة مقدارها hf .

وسوف نرى لاحقًا كيف ترتبط طاقة الفوتون بتركيب الذرات والجزيئات . دعنا الآن نطبق نموذج أينشتين للحزمة الضوئية على الأثر الكهروضوئى .

إذا كان الضوء مكونًا من فوتونات ، فإنها سوف تتصادم مع الإلكترونات المنفردة مثلما ترتطم حزمة الضوء بمادة ما . وعندما تكون طاقة الفوتون أكبر من الطاقة اللازمة لانتزاع إلكترون وتحريره من المادة ، فإن الإلكترونات تنبعث فى نفس اللحظة التى يسقط فيها الضوء على المادة . أما إذا كانت طاقة الفوتون أقل من تلك القيمة ، فلن ينبعث أى إلكترون مهما كانت شدة الضوء الساقط على الفلز . (وفرصة ارتطام فوتونين بإلكترون واحد فى نفس اللحظة تكاد تكون صفرًا) . ويتضح لنا من أول وهلة أن الطاقة

الجدول 1–26 :

دالة الشغل والطول الموجى الكهروضوئى المشرفى لبعض المواد المختارة				
الطول الموجى المشرفى		دالة الشغل (ϕ)		
منطقة الطيف	nm	10^{19} J	(eV)	المادة
المرئى	592	3.36	2.10	روبيديوم
المرئى	581	3.42	2.14	سيزيوم
المرئى	541	3.68	2.30	بوتاسيوم
فوق البنفسجى	290	6.85	4.28	ألمونيوم
فوق البنفسجى	273	7.28	4.55	تنجستين
فوق البنفسجى	267	7.44	4.65	نحاس
فوق البنفسجى	244	8.18	5.10	ذهب
فوق البنفسجى	220	9.04	5.65	بلاتين

اللازمة لانتزاع إلكترون من اللوح مساوية تمامًا لطاقة فوتون ذى طـول موجـى مشرفـى . وعلى ذلك يكون أدنى شغل يلزم لانتزاع الإلكترون وتحريره من الجسم الصلب هو

$$\text{الحد الأدنى للشغل} = \phi = \frac{hc}{\lambda_0} = hf_0$$

حيث يمثل هذا الحد الأدنى للشغل بالرمز ϕ ويسمى **دالة الشغل** لمادة معينة وقد أوردنا فـى الجـدول 1–26 قيمًا لدالـة الشغـل لقليـل مـن الفلـزات . ويلاحـظ أن الضـوء فـوق البنفسجى هو الذى يلزم فى العديد من الحالات لانتزاع الإلكترونات من الفلزات .

وعندما يكون للفوتـون طاقـة أكبـر مـن ϕ ، أى عندمـا يكـون λ أصغـر مـن λ_0 فـإن الإلكترون لن يقتلع من اللوح فحسب وإنما سيمتلك فائضًا من الطاقة أيضًا . أى أن جزءًا من طاقة الفوتون hc/λ سوف يفقد لبذل الشغل ϕ ، أو لتحريـر الإلكـترون أمـا البـاقى فيظهر على صورة طاقة حركة للإلكترون . وعلى ذلك يمكننا بالنسبة لطاقات غيـر نسبوية ، أن نكتب ما يلى ،

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi \qquad (26\text{–}5)$$

وهى **المعادلة الكهروضوئية** .

إن لـمعظم الإلكترونات الضوئية المنبعثة طاقة حركة أقل مـن $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max}$ ، الواردة فى المعادلة (5–26) لأنها تتعرض لتصادمات عديدة قبل أن تغادر المادة . وهكذا فإن $\frac{1}{2}mv^2$ فـى المعادلـة (5–26) هـى نفسـها $(KE)_{\max}$ فـى المعادلـة (4–26) . ونجـد عنـد مقارنـة المعادلـة (5–26) مـع المعادلـة (4–26) أن A فـى المعادلـة (4–26) لابـد أن تكـون hc . وتشير التجـارب إلى أن القيمـة العدديـة للثـابت A هـى بـالفعل hc وكتـأكيد أخيـر

للمعادلة (26-5) فإن دالة الشغل ϕ كما تتحدد بمساواتها بالقيمة العملية للثابت B فى المعادلة (26-4) هى نفس دالة الشغل التى يتم تعيينها من تجارب مختلفة تمامًا .

وهكذا نستطيع أن نستنتج أن الإلكترونات الضوئية تنبعث من مادة ما إذا كان الفوتون الساقط على المادة له طاقة كافية لطرد ذلك الإلكترون . وطاقة الفوتون hf وهى نفسها hc/λ . والفوتون الذى طوله الموجى الشرفى λ_0 ، ستكون طاقته hc/λ_0 ، وهى تساوى دالة الشغل ϕ . ومثل هذا الفوتون قادر بالكاد على إطلاق إلكترونات ضوئية . أما الفوتونات التى لها أطوال موجية أقصر من λ_0 فلديها طاقة أكثر مما يكفى لإطلاق إلكترونات ضوئية ، ولذا يظهر فائض الطاقة على صورة طاقة حركة للإلكترون الضوئى .

مثال توضيحى 26-4

ما هى طاقة فوتون فى حزمة إشعاع تحت الأحمر طوله الموجى 1240 nm ؟

استدلال منطقى :

$$\text{طاقة الفوتون} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626\times10^{-34})(3.00\times10^{8}\ \text{m/s})}{1240\times10^{-9}\ \text{m}}$$

$$= 1.602\times10^{-19}\ \text{J} = 1.00\ \text{eV}$$

حيث قمنا باستعمال معامل التحويل $1\ \text{eV} = 1.602\times10^{-19}\ \text{J}$

ومن المناسب تذكر هذه النتيجة : **إن الفوتونات المكونة لإشعاع طوله الموجى 1240 nm ستكون طاقتها 1 eV** . والضوء الذى طوله الموجى ، مثلاً ، 1240/4 nm ستكون طاقة فوتوناته $4\times1\ \text{eV}$. ■

مثال توضيحى 26-5

أوجد طاقة الفوتون فى كل من الحالات الآتية : (أ) موجات لاسلكية (راديو) طولها الموجى $\lambda = 100$ m ؛ (ب) ضوء أخضر له $\lambda = 550$ nm ؛ (جـ) أشعة إكس حيث $\lambda = 0.200$ nm .

استدلال منطقى : باستخدام نتيجة المثال التوضيحى رقم 26-4 نجد أن :

(أ) $$\frac{1240\times10^{-9}\ \text{m}}{100\ \text{m}}\times1\ \text{eV} = 1.24\times10^{-8}\ \text{eV}$$

(ب) $$\frac{1240}{550\ \text{nm}}\times1\ \text{eV} = 2.25\ \text{eV}$$

(جـ) $$\frac{1240}{0.200\ \text{nm}}\times1\ \text{eV} = 6200\ \text{eV}$$

لاحظ الطاقات المرتفعة لفوتونات أشعة إكس .

تمرين : القدرة المصاحبة لحزمة ليزر ($\lambda = 633$ nm) هى 2.0 mW ؛ أى إنها تحمل

طاقة مقدارها 2.0 mJ عند أية نقطة فى الثانية . ما عدد الفوتونات التى تمر بنقطة ما فى مسار الحزمة كل ثانية ؟ الإجابة : 6.4×10^{15} .

مثال 3-26

عندما يسقط ضوء طوله الموجى 500 nm على سطح معين فإن جهد الإيقاف للإلكترونات الضوئية هو 0.44 V . ما هى دالة الشغل لهذه المادة ؟ وما هو أطول طول موجى يستطيع إخراج إلكترونات من سطح تلك المادة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يمثل جهد الإيقاف ؟

الإجابة : تنطلق الإلكترونات الضوئية من السطح بطاقة فائضة عن أدنى حد للطاقة المطلوبة . وجهد الإيقاف V_0 هو الجهد المثبط ، اللازم لإيقاف أكثر الإلكترونات طاقة حتى لا يصل إلى المجمِّع . وعلى هذا فالمقدار eV_0 يساوى $(KE)_{max}$ للإلكترونات .

سؤال : كيف ترتبط V_0 بدالة الشغل ؟

الإجابة : دالة الشغل ϕ هى أدنى طاقة لازمة لإطلاق إلكترون . وتتحول طاقة الفوتون الفائضة إلى طاقة حركة KE للإلكترون . وهذا ما توضحه المعادلة 5-26 :

$$(\frac{1}{2}mv^2)_{max} = eV_0 = \frac{hc}{\lambda} - \phi$$

سؤال : ما هو الشرط الذى يحدد قيمة أطول طول موجى يكفى لإخراج إلكترون ؟

الإجابة : الشرط هو أن تكون طاقة الفوتون قادرة على إخراج إلكترون بدون فائض KE .

الحل والمناقشة :

$$\phi = \frac{hc}{\lambda} - eV_0$$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{5 \times 10^{-7}\ m} - (1.6 \times 10^{-19}\ C)(0.44\ V)$$

$$= 3.27 \times 10^{-19}\ J = 2.05\ eV$$

ومن ثم ،

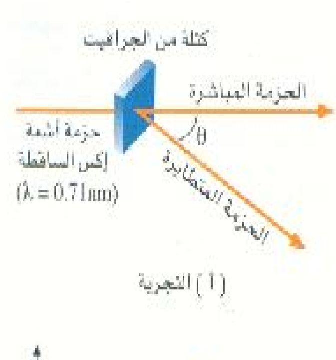
$$\lambda_0 = \frac{hc}{\phi}$$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{3.27 \times 10^{-19}\ J} = 608\ nm$$

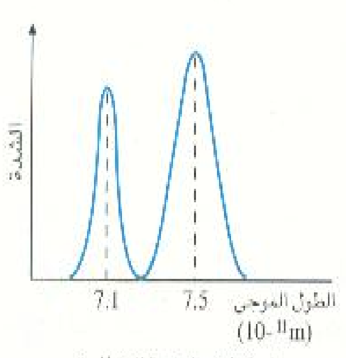
وإذا رجعنا إلى الجدول 1-26 لاستنتجنا أن المادة هى الروبيديوم .

26-9 أثر كومتون : كمية تحرك الفوتون

حيث أن كلاً من الضوء وأشعة إكس من الموجات الكهرومغناطيسية ، فلابد أن ينطبق مفهوم الفوتون على أشعة إكس أيضًا . وقد قدم أ.هـ. كومتون عام 1923 البرهان المباشر على وجود فوتون أشعة إكس لأول مرة . فقد لاحظ أنه عندما تسقط حزمة وحيدة اللون من أشعة إكس على كتلة مصنوعة من الجرافيت ، فإن نوعين من أشعة إكس يتطايران من تلك الكتلة (الشكل 12-26) ، وكان الطول الموجى لأحد النوعين هو نفس الطول الموجى للإشعاع الساقط ، أما النوع الآخر فكان طوله الموجى أطول من الذى للأشعة الساقطة . ويمكن تصوير ذلك الجزء من الأطوال الموجية الذى لا يتغير على أنه قد نشأ على النحو التالى : المجال الكهربى المهتز فى الحزمة الساقطة يجعل شحنات الذرة تهتز بنفس تردد الموجة . وتعمل هذه الشحنات المهتزة كالهوائى الذى يبث موجات لها نفس التردد والطول الموجى . ولذلك تكون أشعة إكس المتطايرة هى موجات أعيد إشعاعها من الشحنات الذرية المهتزة .



(أ) التجربة



(ب) طيف الحزمة المتطايرة
(θ=135°)

شكل 12-26:
أثر كومتون . عندما تتطاير أشعة إكس (λ = 0.071 nm ، فى هذه الحالة) ، فإن الحزمة المتطايرة ستكون لها مركبتان . إحداهما لها نفس الطول الموجى الذى للحزمة الأصلية والثانية لها طول موجى أطول .

وكما قلنا من قبل ، فبالإضافة إلى هذه الحزمة من أشعة إكس المتطايرة ، هناك نوع آخر من أشعة إكس المتطايرة ، وهو النوع الذى طوله الموجى أطول قليلاً . والطول الموجى الدقيق لهذه الأشعة يعتمد على الزاوية θ التى تتطاير عندها الأشعة بطريقة محكمة وبسيطة نسبيًا .

ولم يتيسر تفسير لوجود هذه الأشعة باستخدام الصورة الموجية لأشعة إكس . إلا أن كومتون وبيتر ديباى قدما تفسيرًا بسيطًا ، كل على حدة وبشكل مستقل عن أحدهما الآخر . لقد افترضا أن التطاير الأساسى كان بمثابة تصادمات مرنة بين فوتونات أشعة إكس . والكترونات ذرات الجرافيت ، بحيث تكون طاقة حركة وكمية تحرك نظام الإلكترون - فوتون محفوظتين . وحيث أن طاقة ربط الإلكترون داخل الجرافيت مهملة بالنسبة لطاقة فوتون أشعة إكس ، فإن الإلكترون يتصرف - أساسًا - كجسيم حر عندما يرتطم به فوتون .

علينا - إذا أردنا تحليل تصادم الفوتون مع الإلكترون - أن نتصور كيفية التعبير عن كمية تحرك الفوتون . لقد أصبح لدينا - فعلاً - معلومتان حول الفوتون : (1) حيث أن الفوتونات تمثل ضوءًا ، فلابد أن سرعتها هى c ، (2) تعتمد طاقات الفوتونات على أطوالها الموجية ، $E = hc/\lambda$. وقد يكون من المغرى أن نتذكر التعريف الكلاسيكى لكمية التحرك وهو mv ، ثم نكتب $p = mc$ بالنسبة للفوتون ، ولكن المشكلة أننا لا نملك قيمة محددة لكتلة الفوتون . ونستطيع - فى الواقع - أن نثبت أن **كتلة السكون للفوتون لابد وأن تكون صفرًا !** فحيث أن الفوتون ينتقل فى الفراغ بسرعة مقدارها c ، فإنه يكون لدينا ،

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-1}} = \frac{m_0}{0}$$

فإذا كان للمقدار m_0 أى قيمة خلاف الصفر ، لكانت m لا نهائية . وحيث أن $E = mc^2$ ، فإن الكتلة اللانهائية للفوتون ستقتضى طاقة لا نهائية له ، وهذا ـ كما نعلم ـ غير صحيح . ولابد أن نستنتج إذن أن $m_0 = 0$. فإذا بدا لك هذا الأمر غريبًا فتذكر أن **الفوتون لا يكون أبدًا ساكنًا** . إنه ينبعث ويمتص بسرعة الضوء . **إن فوتونًا يتحرك عبر الفراغ لن ينتقل مطلقًا بسرعة بخلاف** c . والكتلة الوحيدة التى لمثل هذا الجسيم سيكون مردها إلى طاقة حركته ولذلك فإن

$$E_{\text{photon}} = (m - m_0)\,c^2 = mc^2 = \frac{hc}{\lambda}$$

ومن هذه العلاقة نستطيع أن نحدد تعبيرًا لكمية تحرك الفوتون ، يكافئ المقدار mc :

$$\text{كمية تحرك الفوتون} = p = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \qquad (26\text{–}6)$$

وفى حالة تطاير (استطارة) كومتون ، يقدم الفوتون بعضًا من طاقته وكمية تحركه إلى الإلكترون الذى ارتطم به . وبما أن هاتين الخاصيتين تنطويان على الطول الموجى فإن فوتون أشعة إكس المتطاير لابد أن يكون طوله الموجى مختلفًا عن الطول الموجى لفوتون أشعة إكس الساقط . وإذا ما طبقنا مبادئ حفظ طاقة الحركة وكمية التحرك ، باستخدام العلاقتين $E = hc/\lambda$ و $p = h/\lambda$ للفوتون فسنصل إلى ما حصل عليه كومتون وديباى للتغير فى الطول الموجى :

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \qquad (26\text{–}7)$$

حيث m_e هى كتلة السكون للإلكترون و θ هى الزاوية التى ترصد عندها أشعة إكس المتطايرة بالنسبة للحزمة الساقطة (الشكل 13–26) . ويلاحظ أن التغير فى الطول الموجى يعتمد **فقط** على الزاوية التى تتطاير بها أشعة إكس . أما المقدار $h/m_e c$ فهو ثابت وله أبعاد طول ويعرف باسم **الطول الموجى لكومتون** بالنسبة للإلكترون ، وقيمته 2.43×10^{-12} m . وتتراوح قيمة $\Delta\lambda$ من 0 عند $\theta = 0°$ إلى $2h/m_e c$ عند $\theta = 180°$.

ولقد وجد أن المعادلة (7–26) متفقة تمامًا مع النتائج التجريبية لكومتون واعتبر هذا تأكيدًا صارخًا للخصائص التفاعلية ذات الصفة الجسيمية للموجات الكهرومغناطيسية مع المادة .

تمرين : اثبت أن البيانات الواردة فى الشكل 12–26 تخضع للمعادلة (7–26) .

فوتون طوله الموجى λ

إلكترون

(أ) قبل التصادم

اتجاه السقوط

θ

فوتون طوله الموجى λ' $(\lambda' > \lambda)$

(ب) بعد التصادم

شكل 13–26:
يصطدم الفوتون بإلكترون ما فى ظاهرة كومتون بحيث تظل الطاقة وكمية التحرك محفوظتين .

الجزء الثالث : ميكانيكا الكم

26–10 الطول الموجى لدى برولى

لقد رأينا فى ما سبق أن للإشعاع الكهرومغناطيسى طبيعة مزدوجة . فهو يحمل خصائص موجية تجعله يظهر تأثيرات التداخل والحيود . كما أن له سلوك الجسيمات

كما يتضح من خواصه الفوتونية . ومن الطبيعي في وجود هذه الثنائية أن نتكهن أن للإلكترون ، وربما جسيمات أخرى ، خواص موجية .

وبالفعل ، كان لويس دى برولى أول من اقترح - بجدية - الطبيعة المزدوجة للإلكترون . وكان من بين ما دفعه إلى اقتراحه ذلك ، النظرية الموجية لنيلز بوهر حول ذرة الهيدروجين . فقد اكتشف دى برولى عام 1923 أنه يستطيع تبرير أحد فروض بوهر الرئيسية تبريرًا منطقيًا إذا اعتبر أن للإلكترون خواص موجية . وسوف نقفز مباشرة إلى نتيجة دى برولى بدلاً من الغوص في الأحداث التاريخية التى أدت إليها .

إن كمية تحرك الفوتون - كما رأينا - هي h/c (المعادلة 6-26) ولذلك فإن طوله الموجي هو $\lambda = h/p_{\text{photon}}$. وبالمثل ، فإذا كان لجسيم ما خواص موجية ، فقد يرتبط



إذا اعتبرنا أن هذين الجسيمين لهما تقريبًا نفس الكثافة فأيهما يُتوقع أن يُظهر آثارًا موجية أقوى ، لو أنهما يتحركان بنفس السرعة ؟ (الواقع أن كليهما سيسلك سلوكًا كلاسيكيًا) .

الطول الموجي المصاحب له وكذا كمية تحركه بمعادلة شبيهة بهذه . وقد افترض دى برولى أن للجسيمات خواص موجية وأن طولها الموجي هو

$$\text{الطول الموجي لدى برولى} = \lambda = \frac{h}{p} \qquad (26\text{-}8)$$

حيث h هو ثابت بلانك و p كمية تحرك الجسيم المعني .

وقد قام البرهان على صحة افتراض دى برولى تجريبيًا بطريق الصدفة على أيدى س.ج دافيسون و ل.هـ .جيرمر عام 1927 . لقد كانا يبحثان في تطاير حزمة من الإلكترونات عند سقوطها على بلورة فلزية (النيكل) . ويصور الشكل 14-26 رسمًا تخطيطيًا للجهاز الذى استخدماه وكان بداخل غرفة مفرغة . وكانت التجربة تبدأ بتعجيل حزمة من الإلكترونات عن طريق إكسابها طاقة عند عبورها في فرق جهد كهربى V . ثم كانت القياسات تجرى لمعرفة عدد الإلكترونات المتطايرة من سطح البلورة عندما تسقط عليها الحزمة . وكانت النتيجة غير المتوقعة لهذه التجربة أن الإلكترونات

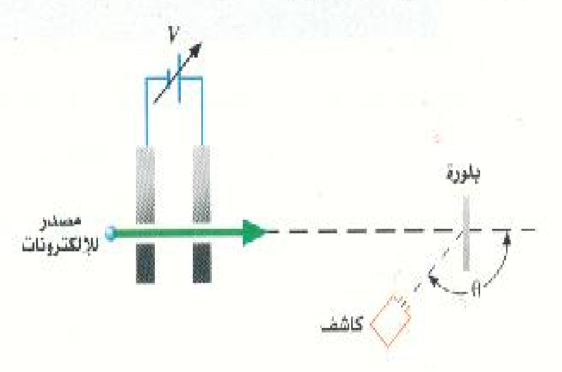
كانت تتطاير بقوة عند زوايا خاصة معينة فقط . وحينئذ لم يتمكن دافيسون وجيرمر من تفسير ذلك .

ثم تقدم بعضهم باقتراح إلى الباحثين بأن تلك النتيجة قد تكون برهانًا لأفكار دى برولى . وعندئذ عكف الاثنان على مزيد من القياسات مستخدمين بلورات تم توجيهها بشكل صحيح لمعرفة ما إذا كانت الزوايا المحددة بكل وضوح للإلكترونات المتطايرة قابلة للتفسير فى ضوء ظواهر التداخل التى تنشأ عن المسافات المنتظمة بين صفوف الذرات داخل البلورة والتى تؤدى دور محزوز للحيود ذى نوع خاص وجدير بالذكر هنا أن الفيزيائيين و.هـ. براج وابنه و.ل. براج قد وضعا نظرية حيود أشعة إكس بواسطة البلورات عام 1913 ؛ وكان ذلك أساسًا لعلم البلورات باستخدام أشعة إكس والذى يرجع إليه الفضل فى معرفة تركيب البلورات والجزيئات المعقدة مثل جزئ DNA . وقانون براج لحيود أشعة إكس مطابق من حيث الشكل لمعادلة المحزوز التى استخدمناها فى الفصل الرابع والعشرين .

إذا كانت المسافة بين مستويات بلورة ما هى d ، وكان الطول الموجى هو λ ، فإن انعكاسًا قويًا (تداخل بناء) لابد أن يقع عند الزوايا التى تعطى بالعلاقة

$$m\lambda = 2d \sin \theta_m \qquad m = 1, 2, 3, \ldots\ldots$$

حيث θ فى هذه الحالة هى الزاوية بين الحزمة المتطايرة ومستوى التشتت (التطاير) ، والمسافة d فى معظم البلورات من رتبة 0.1 nm . ولعلك تذكر أن ظواهر التداخل تتجلى فقط عندما يكون الطول الموجى للضوء الساقط له نفس تباعد المحزوز تقريبًا . وعندئذ لابد لحدوث حيود بالبلورة أن يكون الطول الموجى 0.1 nm بالتقريب ، وهو ما يقع فى منطقة أشعة إكس من الطيف الكهرومغناطيسى .



شكل 14-26: قاس دافيسون وجيرمر أعداد الإلكترونات المنعكسة من البلورة عند زوايا مختلفة .

وحيث أن دافيسون وجيرمر كانا يعرفنا قيمة d وقاسا مواقع الانعكاس القوى θ للإلكترونات فإنهما تمكنا من حساب λ . ومن ناحية أخرى ، حيث أن $\frac{1}{2}mv^2 = Ve$ ، فإنهما استطاعا حساب كمية تحرك الإلكترونات :

$$p = mv = \sqrt{2Vme}$$

حيث V هو فرق الجهد الكهربى الذى تعجل من خلاله حزمة الإلكترونات ، ومن هذه القيمة تمكن دافيسون وجيرمر من إيجاد الطول الموجى لدى برولى مرة ثانية ، $\lambda = h/p$ ؛

ووجدا أن قيمتى λ متطابقتان . وبعبارة أخرى ، تنعكس الإلكترونات بنفس الطريقة التى لابد أن تنعكس بها موجات دى برولى المصاحبة لها . وهذا هو البرهان المباشر لفكرة دى برولى من أن للإلكترونات خواص موجية .

وبمرور السنين اتضح أن النيوترونات والبروتونات والذرات والجزيئات مثلها مثل الجسيمات الأخرى تبدى نفس الظواهر الموجية التى للإلكترونات . ولذلك فنحن مضطرون للاعتقاد بأن الجسيمات المتحركة عبر حيز ما ، تتصرف كموجات طولها الموجى h/p ، حيث h هو ثابت بلانك و p هو كمية تحرك الجسيم المعنى . وسنناقش فى المثال التوضيحى 7–26 السبب فى أن هذا السلوك لم تتم ملاحظته من قبل للجسيمات الماكروسكوبية (الكبيرة) .

مثال توضيحى 6–26

تصل سرعة الإلكترون أحيانًا داخل أنبوبة التليفزيون إلى 5×10^{7} m/s . ما هو الطول الموجى لدى برولى المصاحب لهذا الإلكترون ، إذا تغاضينا عن تأثيرات النسبية ؟

استدلال منطقى : إذا عوضنا من هذه الأرقام فى المعادلة 8–26 لوجدنا أن $\lambda = 0.145 \times 10^{-10}$ m . والطول الموجى المصاحب للإلكترون يقع فى الظاهر فى مدى أشعة إكس (ولا نعنى بهذا الإشارة إلى أن موجات دى برولى ترتبط بالموجات الكهرومغناطيسية لأنها بالتأكيد ليست موجات كهرومغناطيسية من حيث طبيعتها . وسنتناول أمورًا أكثر من هذه حول الموضوع فى القسم التالى .) ■

مثال توضيحى 7–26

صف نمط الحيود الذى قد يحدث إذا أطلقت رصاصة (كتلتها $m = 0.1$ g و $v = 200$ m/s) عبر فتحة عرضها 0.20 cm .

استدلال منطقى : يعطى الطول الموجى لموجة دى برولى المصاحبة للطلقة من العلاقة :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{(10^{-4})(2 \times 10^{2})} = 3.3 \times 10^{-32} \text{ m}$$

ونعلم أن ظواهر الحيود والتداخل تصبح كبيرة إذا كانت λ مقارنة بعرض الفتحة أو التباعد (راجع القسم 8–24) ، ولذلك نستطيع استنتاج أن ظواهر التداخل مهملة . ولبيان ذلك بوضوح ، سنقوم بإيجاد الزاوية θ بين الحزمة المارة مباشرة فى خط مستقيم والحد الأدنى للحيود الذى يحدث عند (المعادلة 5–24) .

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{\text{slit width}} = 1.6 \times 10^{-29}$$

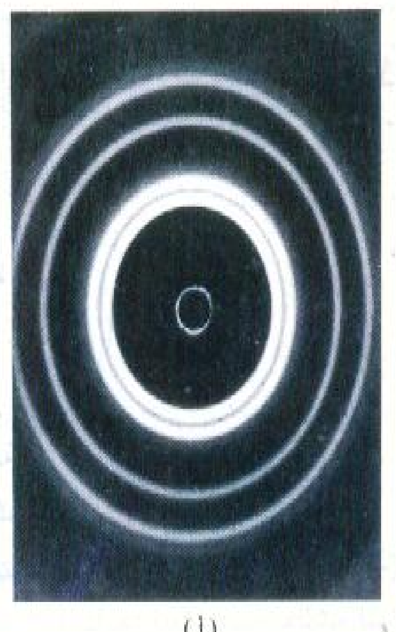
وبعبارة أخرى ، ستكون زوايا الحيود كلها من الصغر بحيث تنتقل جميع الجسيمات

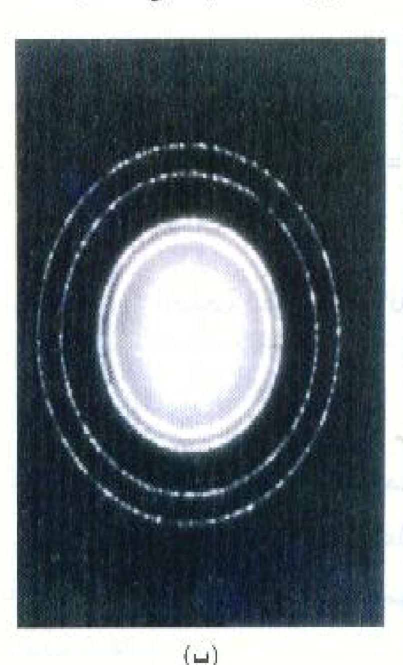
فى خط مستقيم لتمر من الفتحة . تنتج إذن حركة فى خط مستقيم وتصبح الظواهر الموجية غير ملحوظة . ويحدث هذا الموقف دائمًا فى التجارب الماكروسكوبية ، ولهذا السبب فإن ظواهر دى برولى الموجية غير ملحوظة بالنسبة لحركة الجسيمات الماكروسكوبية .

26-11 الميكانيكا الموجية فى مقابل الميكانيكا الكلاسيكية

أدى اكتشاف الخواص الموجية للجسيمات إلى نتائج خطيرة بالنسبة لتفسير حركة الجسيمات وكذلك بالنسبة للميكانيكا بشكل عام . ولابد أن نبحث فى الظروف التى تجعل الطبيعة الموجية للجسيمات من الأهمية بمكان بحيث تجعلنا نعدل من الوصف الكلاسيكى (التقليدى) لسلوك الجسيمات . ويمكننا فى هذا السبيل - أن نعول على معارفنا السابقة حول السلوك الموجى كالحيود والتداخل .

يدل تفسير نمط حيود الضوء باستخدام مفهوم الفوتون ، على أن النمط يمثل توزيع مسارات الفوتونات المارة عبر الفتحة . ولذلك تكون مناطق شدة الإضاءة القصوى هى حيث تذهب معظم الفوتونات . يرينا الشكل 15-26 (أ) نمط تداخل حزمة من أشعة إكس المارة من غشاء من الألمونيوم ، أما الشكل 15-26 (ب) فيبين النمط الذى تكون عندما أطلقت إلكترونات عبر نفس الغشاء . ويشير التشابه بين نمطى حيود أشعة إكس والإلكترونات إلى وجود ظروف متشابهة بالنسبة لموجات دى برولى فإذا استخدمنا الأطوال الموجية لدى برولى فى حالة الإلكترونات ، لتمكننا من التنبؤ بالموقع الذى يحظى بأكبر احتمال لأن ترتطم به إلكترونات فيما وراء فتحة ضيقة فى الحائل .

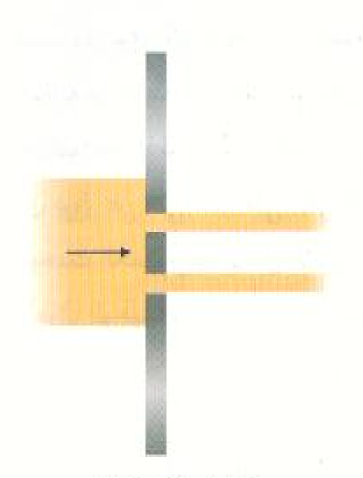

(أ)


(ب)

شكل 15-26:
نمط الحيود الناتج من حزمة من (أ) أشعة إكس و (ب) الإلكترونات الساقطة على هدف من غشاء من الألمونيوم .

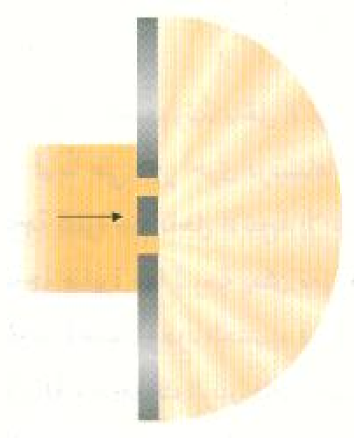
سنعتبر الآن الحالتين المبينتين فى الشكل 16-26 . لو أن موجة نفذت من حاجز به فتحتان أوسع كثيرًا من الطول الموجى فإن الموقف سيكون كما هو موضح فى الشكل 16-26 (أ) حيث يظهر ظلان محددان لحواف الفتحتين . وقد رأينا فى المثال

التوضيحى رقم 7-26 أن هذا هو ما يحدث مع الجسيمات الماكروسكوبية . إلا أن الجسيمات ذات الكتل الصغيرة للغاية (كالإلكترونات مثلاً) لها كمية تحرك صغيرة جدًا حتى وإن كانت سرعاتها مرتفعة جدًا . ويعنى هذا أن أطوال دى برولى الموجية يمكن مضاهاتها بسهولة بأبعاد التجربة الماكروسكوبية ولذلك قد تصير خواصها الموجية ملحوظة . والإلكترونات النافذة عبر نفس الفتحتين يمكنهما إحداث توزيع كالذى يبينه الشكل 16-26 (ب) ، حيث التحكم فى مساراتها يكون بالطبيعة الموجية لها أكثر مما هو بالميكانيكا الكلاسيكية للجسيمات . وبالرجوع إلى سؤالنا الأساسى حول متى تفشل الميكانيكا الكلاسيكية ، فيمكننا النص على ما يلى :



(أ) عرض الفتحة $>> \lambda$

تصبح الميكانيكا الكلاسيكية عاجزة عندما يكون طول دى برولى الموجى للجسيم مقاربًا أو أصغر من أصغر أبعاد التجربة .



(ب) λ مقارنة لأبعاد الفتحة

شكل 16-26:
(أ) عندما يكون الطول الموجى المصاحب لجسيم ما أصغر بكثير من عرض الفتحة ، فإن صورًا واضحة ومحددة للفتحة ستتكون بواسطة الجسيمات النافذة . (ب) أما عندما تقترب λ من عرض الفتحة فإن ظواهر تداخل نموذجية يمكن رؤيتها فى توزيع الجسيمات الخارجة .

إن احتمال حدوث هذا الموقف هو فقط عند معالجة جسيمات ذرية وما دون الذرية . وتسود الظواهر الموجية - بشكل خاص - سلوك الإلكترونات داخل الذرات وعندئذ علينا أن نستبدل بالميكانيكا الكلاسيكية ، **الميكانيكا الموجية** . ولأسباب سنلتقى بها بعد قليل كثيرًا ما يشار إلى الميكانيكا الموجية باسم **ميكانيكا الكم** .

وما إن اقترح دى برولى وجود الطبيعة الموجية للجسيمات حتى بادر العالم الألمانى إدوين شرودنجر إلى وضع معادلة تصف الخواص الموجية للجسيمات . لقد أصبحت **معادلة شرودنجر** - وهى شبيهة بالمعادلة التى تستخدم لوصف سلوك الموجات الكهرومغناطيسية - تشكل حجر الأساس لميكانيكا الكم . وإذا كانت المبادئ النيوتونية (الكلاسيكية) لازالت قادرة على حل معظم المسائل الماكروسكوبية ، إلا أن الظواهر النسبوية تصبح مهمة عندما تقترب سرعات الجسيم من سرعة الضوء فحسب أو عندما يستلزم الأمر وجود نتائج دقيقة جدًا . وتحل ميكانيكا الكم محل الميكانيكا النيوتونية عندما نتناول أبعادًا مقاربة للأطوال الموجية فحسب . وسنرى فى الفصل التالى أن ميكانيكا الكم لابد وأن تستخدم فى تفسير ما يجرى داخل الذرة نفسها .

26-12 الرنين فى موجات دى برولى : الحالات المستقرة

عندما تناولنا الموجات الميكانيكية مثل تلك التى تحدث فى الأوتار والموجات الصوتية داخل الأنابيب ، فقد اكتشفنا الأهمية الكبيرة لرنين الموجات ، وتظل الأهمية قائمة أيضًا بالنسبة لموجات دى برولى . وسنقوم الآن بمعالجة موقف بسيط يتضمن حدوث رنين لموجات دى برولى .

القضية الأولى : جسيم داخل أنبوبة

اعتبر أن لديك جسيمًا كتلته m داخل أنبوبة ضيقة طولها L وطرفاها مغلقان كما هو واضح من الشكل 17-26 (أ) . وإذا كان هذا الجسيم سيتصرف كموجة فلابد أن

موجة دى برولى المصاحبة لـه ستحدث رنينًا فـى الأنبوبـة ، كمـا يتضـح مـن الأجـزاء السفلية من الشكل ، ويطلق على مثل هذا الرنين **حالة مستقرة** . وحيـث أن الجسـيم لا يستطيع مغادرة الأنبوبة ، فلابد أن طرفيها يمثلان عقدتين . (تذكر أن سعات موجـات دى برولى هى التى تدلنا على أكثر الأماكن احتمـالاً لأن يوجـد فيـه الجسـيم) . وهكـذا سيحدث الجسيم رنينًا داخل الأنبوبة عندما يكون لموجـة دى بـرولى المصاحبـة للجسـيم الأطوال الموجية التالية (تذكر أن المسافة بين عقدتين هو $\frac{1}{2}\lambda$) :

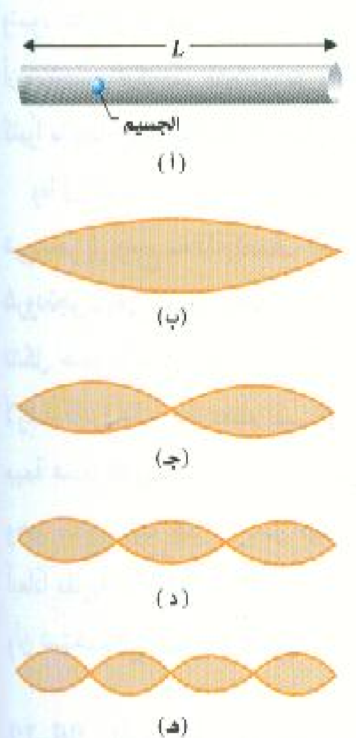
$$L = \frac{1}{2}\lambda_1 \qquad L = 2\left(\frac{1}{2}\lambda_2\right) \qquad L = 3\left(\frac{1}{2}\lambda_3\right) \qquad \ldots$$

أو بشكل عام ، فإن الحالة المستقرة لجسيم ما ستحدث عندما :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad \text{حيث} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots.$$

ولن يحدث الجسيم رنينًا داخل الأنبوبة إلا إذا كان له أحد هذه الأطوال الموجية الرنينية .

قياسًا على صور أخرى درسـناها للرنـين نسـتطيع أن نسـتنبط مـا يلـى : لا تتنـامى موجة كبيرة جدًا داخل الأنبوبة إلا عند رنين موجة فقط ، فيمـا عـدا ذلـك تكـون سـعة الموجة صغيرة جدًا لدرجة يمكن معها إهمالـها . وحيث أن سعة موجة دى برولى بمثابة مقياس لاحتمال وجود الجسـيم فـى مكـان مـا ، فإننـا نتوقـع أن يتواجـد الجسـيم فـى الأنبوبة عند حدوث الرنين فقط . أضف إلى ذلـك أن الجسـيم سـيتواجد بأكـبر قـدر مـن الاحتمالات حيث يكون لموجات الرنين المبينة فى الشكل 17-26 أقصى سعة ، أى عند بطون الموجات . . أما حيث توجد العقد ـ وهـذا الأمـر أكـثر إبـهارًا ـ فـإن الجسـيم لـن يتواجد مطلقًا . وقبل أن نسترسـل فـى فحـص هـذه النتيجـة لأبعـد مـن هـذا ، سـنقوم بفحص طاقة الجسيم داخل الأنبوبة .



شكل 17-26:
الحالات المستقرة لجسيم داخـل أنبوبـة . تشير سعة الموجة عند موقع معيـن إلـى الاحتمال النسبى لوجود الجسيم عند ذلـك الموقع .

ليس للجسيم سوى طاقة حركـة ، $\frac{1}{2}mv^2$. (نعتـبر الآن ظروفًـا غـير نسـبوية) . وسنطلق على طاقة الجسيم E_n عندما يكون الجسيم فى الحالـة الرنينيـة التـى رقمـها n أى ؛

$$E_n = \frac{1}{2}mv_n^2$$

إلا أن كمية التحرك p هى mv ولذلك يمكننا كتابة التعبير السـابق هكذا ؛

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m}$$

ولكن الطول الموجى لدى برولى المصاحب للجسيم هو $\lambda_n = h / p_n$ ولذلك ،

$$E_n = \frac{h^2}{2m\lambda_n^2}$$

وفى النهاية ، فقد رأينا أن $\lambda_n = 2L / n$ ، ومن ثم

$$E_n = \frac{n^2h^2}{8mL^2} \quad , \quad n = 1, 2, 3, \ldots.. \qquad (26\text{–}9)$$



وهكذا نصل إلى النتيجة المدهشة وهى أنه لو كان على الجسيم أن يتواجد داخل الأنبوبة فلابد أن يكون له إحدى قيم الطاقة المعطاة بالمعادلة (9-26) وعندئذ يقال أن طاقة الجسيم **مكماة quantized** ولهذا السبب يشار إلى الميكانيكا الموجية عادة باسم ميكانيكا الكم . ولن يكون للجسيم أى قيم للطاقة خلاف هذه القيم . وتتناقض هذه النتيجة المبهرة مع الميكانيكا الكلاسيكية ، التى تتنبأ بأن الجسيم داخل الأنبوبة قادر على إتخاذ أى وكل قيم طاقة الحركة بما فيها الصفر . ألا يجعلنا هذا التناقض بين نتائج الميكانيكا الموجية وخبراتنا المعروفة نكفر بالميكانيكا الموجية ؟ الإجابة هى « لا » وذلك لسبب سنشرحه الآن .

دعنا نقم بحساب طاقات الرنين لحُبيبة غبار دقيقة ($m = 1 \times 10^{-15}$ kg) داخل أنبوبة طولها 50 cm :

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2} = (2 \times 10^{-52}\ \text{J})\,(n^2)$$

أى أن طاقات الحُبيبة هى 2×10^{-52} J و $4(2 \times 10^{-52})$ J و $9(2 \times 10^{-52})$ J وهلم جرًا . يلاحظ مدى ضآلة هذه الطاقات والفرق فيما بينها . إن الفجوة بين قيمتين هى 2×10^{-52} J فحسب ، وهى من الصغر بالمقارنة مع الطاقة الحرارية لجسيم غازى (10^{-21} J) لدرجة أننا لن نستطيع معها أن نحكم إن كانت هناك فجوة للطاقة أم لا . بل إن هذا الأمر أكثر وضوحًا بالنسبة لجسيم ذى كتلة أكبر . ونستنتج من ثم أنه بالنسبة لجميع الجسيمات العادية داخل أنابيب ذات حجم مرئى ، فإن طاقة الجسيم تكون متصلة بالضرورة ؛ فالتجربة العملية لا تسمح لنا برؤية الطبيعة الكمية للطاقة كما تتنبأ بها الميكانيكا الموجية .

ويصير الموقف مختلفًا تمامًا عند معالجة أنابيب ذات أحجام ذرية . افترض أن لدينا إلكترونًا ($m = 9 \times 10^{-31}$ kg) داخل أنبوبة لا يزيد طولها عن 2×10^{-10} m ، وإذن

$$E_n = n^2\,(1.5 \times 10^{-18}\ \text{J}) = 9n^2\text{eV}$$

وهذه الطاقة من الكبر بحيث يصبح من السهل قياس فجوات الطاقة . ونستنتج من ثم ، أن الطبيعة الموجية للجسيمات والسمة الكمية لطاقاتها تكون ذات شأن فى النظم ذات الأحجام الذرية .

القضية الثانية : المتذبذب التوافقى

يطلق على كتلة m تهتز تحت تأثير قوة زنبرك تتبع قانون هوك **متذبذبًا توافقيًا** ويمكننا ـ كتقريب أولى ـ أن نعتبر الذرات المهتزة فى الجزيئات ، متذبذبات توافقية . ويتشابه المتذبذب التوافقى فى كثير من الوجوه مع الجسيم داخل الأنبوبة الذى عالجناه منذ قليل ، ولكن ما يعقد المشكلة هو حقيقة أن للنظام طاقة وضع متغيرة نتيجة تشوه الزنبرك . وحتى مع هذا فإن حركة النظام الرنينية يمكن إيجادها عند حل معادلة شرودنجر ـ والنتيجة النهائية لذلك الحساب ليست بالبعيدة تمامًا عن تلك التى لجسيم داخل أنبوبة . وستكون الطاقة مكماة ـ بشكل خاص ـ ولها القيم التالية :

$$E_n = (n + \frac{1}{2}) \left(\frac{h}{2\pi}\right)\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad , \qquad n = 1, 2, \ldots .$$

حيث k هو ثابت الزنبرك .

ويمكن التعبير عن هذه النتيجة بصورة مثيرة للاهتمام إذا تذكرنا أن تردد الرنين f_0 بالنسبة لكتلة معلقة عند نهاية زنبرك هو

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

وبالتعويض من هذه القيمة فى معادلة E_n نجد ،

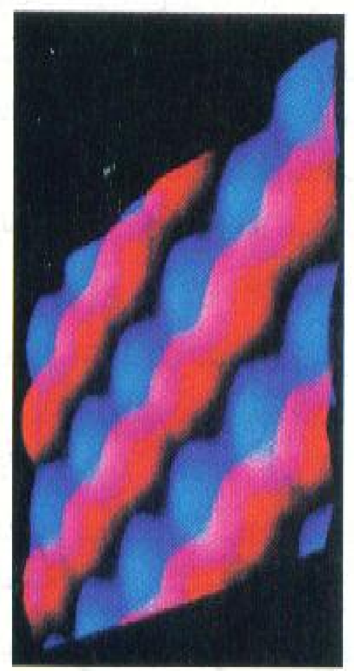
$$E_n = (n+\frac{1}{2})(hf_0) \qquad , \qquad n = 0, 1, 2, \ldots . \qquad (26\text{–}10)$$

أى أن طاقات متذبذب يخضع لقانون هوك مكماة ، والفجوات بين الطاقات المسموح بها مساوية للمقدار hf_0 .

هـذه النتيجـة العجيبـة هـى ببسـاطة الخاصيـة التـى كـان علـى بلانـك أن يلصقـها بالمتذبذبات حتى يتمكن مـن تفسير إشعاع الجسم الأسود . أى أنه بعد مـرور 25 سنة على ما خمنه بلانك ، يأتى استخدام مفاهيم دى بـرولى الموجيـة ويبـين السـبب فـى أن التخمين لابد أن يكون صحيحًا . لقد علمنا فى القسـم 7–26 أن فـرض بلانـك لا يمكـن اختباره بالنسبة لتذبذبات ذات حجم معلى . ونرى الآن أن هذا التخمين غير القائم على دليل ، قد تمت مؤازرته بالعديد من صور نجاح النظرية الكمية . وسـنكتشف المزيـد مـن صور دعم الميكانيكا الموجية فى الفصل التالى .

26–13 مبدأ اللايقين

منذ اكتشاف الطبيعة الموجية للإلكترون والتجارب العديدة تتوالى للنظر فيما إذا كانت هناك جسيمات أخرى تسلك نفس السلوك . ودراسة الجسيمات ذات الأبعاد الذرية أو ما دون الذرية سهلة نسبيًا فيما يتعلق بـالظواهر الموجيـة ، ولم يكتشـف أى اسـتثناء لمعادلة دى برولى للأطوال الموجية . والواقع أن استعمال الإلكترونات والنيوترونـات إلى جانب أشعة إكس فى تجارب الحيود التى صممـت لدراسـة الـتركيب البلـورى ، قـد أصبح من الأمور الشائعة .



لقد تم التقاط الصورة لسطح بلورة أرسينيد الجاليوم باستخدام جـهاز يعـرف باسـم الميكروسكوب النفقى الماسح . وقد استعمل تشفـير لونـى لتوضيـح ذرات الجـاليوم المنفردة بـاللون الأزرق وذرات الزرنيـخ باللون الأحمر . وعلى الرغم مـن أهميـة تركيـب الشبيكـة الذريـة إلا أن الـذرات المنفردة لا زالت تظهر مشوشة بـدلاً مـن ظهورها على هيئة نقط محددة .

تؤدى الطبيعة الموجية لجميع الجسيمات إلى مبدأ فلسفى عظيـم . فقد كـان الجـدل قائمًا بين الفلاسـفة قبل هذا الاكتشاف ، حول ما إذا كان مصير الكون محددًا تمامًا أم لا . هل نستطيع ـ ولو من حيث المبدأ ـ أن نحدد موقع وسرعة وطاقة جميع الجسيمات فـى الكـون ثـم أن نتنبـأ بمجـرى الأحـداث المستقبلية ؟ يبـدو أن الطبيعـة الموجيـة لجميـع الجسيمات تتطلب منا أن نجيب بالنفى علـى هـذا السـؤال . والواقـع أن هـذه الحقيقـة كامنة فى مبدأ اللايقين لـهاينزنبرج الذى سنتولى الآن دراسته .

دعنا ننظر في البداية في كيفية تحديد موقع جسيم ما بأقصى قدر من الدقة ، فلكى نحدد الموقع لابد أن نجعل جسيمًا ثانيًا على الأقل (سنسميه الجسيم المجس) يصطدم مع الجسيم المستهدف ، ثم نسجل الزاوية التي يتطاير بها الجسيم المجس . ولكى نقلل قدر الإمكان من تأثير الجسيم المجس على موقع الجسيم المستهدف ، فإننا سنستخدم فوتونًا منفردًا طوله الموجى λ ليقوم بدور المجس . يحمل هذا الفوتون كمية تحرك مقدارها $p = h/\lambda$ وطاقة مقدارها $E = hc/\lambda$. وسنستخدم كاشفًا للجسيم (قد يكون عدسة مثلاً) يقابل زاوية مقدارها α عند الجسيم باتجاه المحور y . وعند تطاير الفوتون من على الجسيم فإنه ينقل بعضًا من كمية تحركه إلى الجسيم . وسيكتسب الفوتون خلال العملية بعضًا من المركبة x لكمية التحرك ، ولكن مركبة كمية التحرك هذه ستتخذ أقصى قيمة ممكن $\Delta p_x = p \sin \alpha$ حتى يتسنى للفوتون أن يدخل إلى العدسة ويكتشف هناك . وحيث أن كمية التحرك لابد وأن تكون محفوظة ، فإن الهدف لابد أن يكتسب مركبة x من كمية التحرك مساوية ومضادة لتلك التي اكتسبها الفوتون . وكل ما يقال الآن ، هو إنه لكى يتم اكتشاف الفوتون ، فإن كمية تحرك الهدف ستكون **لا يقينية** بالمقدار

$$\Delta p_x = p \sin \alpha = \frac{h}{\lambda} \sin \alpha$$

لقد درسنا في الفصل الرابع والعشرين أن ظواهر الحيود تحد من الدقة التي يمكن بها تحديد موقع مصدر نقطى . ويمكننا كتابة هذا الحد تقريبيًا على أنه $\Delta x \approx \lambda/\sin \alpha$. وعلى ذلك فإن اكتشاف الفوتون كفيل بتحديد موقع الجسيم المستهدف في حدود هذا القدر من اللايقين في الموضع فحسب . فإذا قمنا الآن بضرب قيمتى اللايقين في الموضع وكمية التحرك بالنسبة للجسيم المستهدف ، فإننا نحصل على :

$$\Delta p_x \, \Delta x = \left(\frac{h}{\lambda} \sin \alpha\right)\left(\frac{\lambda}{\sin \alpha}\right) = h$$

وبعبارة أخرى ، فعندما نلجأ لأكثر التجارب دقة ، يمكن تخيلها ، من أجل تحديد موضع جسيم ، ونقيس في نفس الوقت كمية تحركه ، فإن حاصل ضرب مقدارى اللايقين الذاتى لهاتين الكميتين لابد - على الأقل - أن يكون مساويًا لثابت بلانك . ويتضح أن هذه علاقة عامة تمامًا وهى إحدى صور مبدأ هايزنبرج للايقين .

ومن الممكن الوصول إلى صورة أخرى لمبدأ اللايقين من خلال استدلال مشابه لهذا . إذا كان اللايقين في موضع الجسيم الهدف هو $\Delta x \approx \lambda$ ، فإن الزمن الذى يستغرقه الفوتون لكى يقطع هذه المسافة $\Delta t = \lambda/c$. وتتراوح كمية الطاقة التى يمكن للجسيم الهدف أن يستقبلها من الفوتون بين الصفر وحتى قيمة قصوى تساوى طاقة الفوتون كلها hc/λ . ولذلك فإن الطاقة التى يحصل عليها الجسيم تتضمن مقدارًا من اللايقين هو $\Delta E = hc/\lambda$ ، فإذا ضربنا قيمتى اللايقين في الطاقة والزمن ، نحصل على :

$$\Delta E \Delta t = \frac{hc}{\lambda} \frac{\lambda}{c} = h$$

وهكذا أصبح لدينا علاقتان للايقين ، إحداهما تتضمن كمية التحرك والأخرى تتضمن الطاقة ، وقد اقترحتا لأول مرة من فيرنر هاينزنبرج عام 1927 . دعنا الآن نصوغ العلاقتين بصورة أكثر دقة . طبقًا لمبدأ اللايقين لهاينزنبرج فإن :

عند قياس الإحداثى x وكمية التحرك p_x لجسيم ما فى نفس اللحظة فإن ،

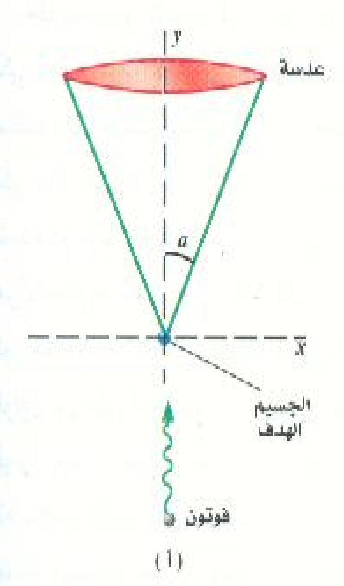
$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \qquad (26\text{-}11)$$

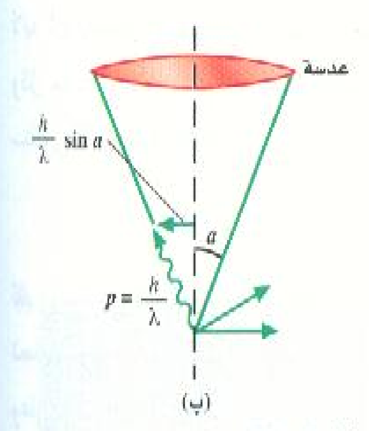
حيث Δx و Δp_x هما قيمتا اللايقين فى x و p . وبالمثل ، عند قياس الطاقة E لجسيم ما فى لحظة t فإن قيمتى اللايقين ΔE و Δt ترتبطان بالعلاقة :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \qquad (26\text{-}12)$$

وسبب وضع العلامة $\geq$ إنه فى حالة أية قياسات واقعية لا مفر من إثارة اضطراب للجسيم المستهدف بدرجة أكبر من التى يحدثها قياس فوتون واحد مثالى .

وهكذا نجد أنه من المستحيل ، ولو من حيث المبدأ ، أن نعرف كل شيء عن جسم ما إذ سيكون هناك دائمًا قدر من اللايقين حول طاقته الحقيقية فى لحظة معينة ، وحول كمية تحركه الحقيقية فى موقع معين . هذه إحدى النتائج الأساسية اللازمة لمفاهيم كمات الضوء والموجات الجسيمية . من الواضح ، إذن ، إن هناك حاجة إلى صياغة جديدة لوصف الجسيمات الذرية وكمات الضوء فى حالات تكون فيها هذه الظواهر مهمة . أى أنه لابد من اللجوء إلى طرق ميكانيكا الكم أو الميكانيكا الموجية لتناول هذه الظواهر .





شكل 18-26:
(أ) فوتون ساقط على جسيم ـ هدف .
(ب) ولكى يتم اكتشاف وجود الجسيم الهدف فإن الفوتون لابد أن يخترق العدسة ، التى تقابل زاوية α عند الجسيم المستهدف . ونتيجة لذلك فإن الجسيم يمكنه أن يحصل على مركبة x لكمية التحرك تصل إلى $(h/\lambda)\sin\alpha$.

افترض أن هناك إلكترونًا محبوسًا داخل مكعب طول ضلعه 10^{-10} m ، وحجم هذا المكعب هو تقريبًا نفس حجم الذرة . احسب القيمة الصغرى لطاقة حركة هذا الإلكترون التى عليه أن يتخذها إذا كان مقيدًا إلى هذا الحيز . يمكنك معالجة KE كلاسيكيًا . وعلى سبيل المقارنة فإن KE للإلكترون فى ذرة الهيدروجين 13.6 eV ، فهل تتفق إجابتك معها ؟

أ

سؤال : ما هو المبدأ الذى يتطلب أن يكون للإلكترون حد أدنى من KE ؟

الإجابة : لا يوجد فى الفيزياء الكلاسيكية ما يتطلب أن تكون KE عند أية قيمة خاصة . فقد تكون صفرًا . ولكن مبدأ اللايقين يتطلب أن تصبح كمية التحرك ـ وهى مرتبطة بالطبع بطاقة الحركة KE ، متضمنة قدرًا أكبر من اللايقين كلما كان موقع الإلكترون معروفًا بدقة أكبر ولذلك لا يمكنك القول بأن p (وبالتالى KE) تساوى صفرًا تمامًا .

سؤال : ما هى العلاقة التى تعطى مقدار اللايقين فى كمية التحرك ؟

الإجابة : يجب أن تكون Δp_x أكبر من $h/4\pi\Delta x$ ، حيث Δx هو الحيز الذى ينحصر الإلكترونات بداخله . وهناك تعبيران مماثلان بالنسبة لكل من اتجاهى y و z .

سؤال : كيف لهذه العلاقة أن تحدد أن هناك قيمة صغرى لكمية التحرك ؟

الإجابة : تنص هذه العلاقة على أنه ليست هناك طريقة لمعرفة أو قياس كمية التحرك فى اتجاه يقل عن هذا اللايقين . ويمكننا من ثم القول بأن القيمة الصغرى للمقدار p_x هى

$$p_{x,\min} = \frac{h}{4\pi\,\Delta x}$$

وبالمثل بالنسبة لكل من p_y و p_z .

سؤال : ما هى العلاقة بين كمية التحرك و KE ؟

الإجابة : بالنسبة لوجهة النظر الكلاسيكية $KE = p^2/2m$ ، وفى حالة الأبعاد الثلاثة

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$$

سؤال : ما هى العلاقة التى أحصل عليها بالنسبة للقيمة الصغرى لطاقة الحركة KE عندما استخدم تعبير الحد الأدنى لكمية التحرك ؟

الإجابة :

$$(\mathrm{KE})_{\min} = \frac{3p_{x,\min}^2}{2m} = \frac{3(h/4\pi\,\Delta x)^2}{2m}$$

حيث m هى كتلة السكون للإلكترون

الحل والمناقشة : إذا استخدمنا للمقدار Δx القيمة 10^{-10} m فسنجد أن

$$(\mathrm{KE})_{\min} = \frac{3(6.63\times10^{-34}\ \mathrm{J.s})^2}{32\pi^2(10^{-10}\ \mathrm{m})^2(9.1\times10^{-31}\ \mathrm{kg})}$$

$$= 4.6\times10^{-19}\ \mathrm{J} = 2.9\ \mathrm{eV}$$

وهذه هى نفس رتبة المقدار الخاص بطاقة الحركة KE للإلكترون فى ذرة الهيدروجين التى بمثابة مثال مختلف قليلاً لإلكترون محصور فى حيز مساوٍ تقريبًا . ومن ناحية أخرى فإلكترون الهيدروجين له أكثر من طاقة الحركة الدنيا الناتجة من التحليل السابق .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) مناط الإسناد ، (ب) مناط الإسناد ذا القصور الذاتى ، (جـ) معامل النسبية ، (د) الطول الصحيح والزمن الصحيح ، (هـ) تمديد الزمن ، (و) انكماش الطول ، (ز) كتلة السكون والكتلة الظاهرية ، (ح) العلاقة بين الكتلة والطاقة ، (ط) طاقة كتلة السكون ، (ى) ثابت بلانك ، (ك) الأثر الكهروضوئى ، (ل) الطول الموجى المشرفى ، (م) دالة الشغل ، (ن) الفوتون ، (س) الطول الموجى لكومتون ، (ع) الطول الموجى لدى برولى ، (ف) الحالة المستقرة ، (ص) الطاقة المكماة ، (ق) مبدأ اللايقين .

2 أن تذكر فرضى النسبية الأساسيين .

3 أن تذكر النتائج التى تمخضت عنها نظرية النسبية من حيث ما يلى : أقصى سرعة للأشياء ، الأحداث المتزامنة ، تمديد

الزمن ، انكماش الطول ، تغير الكتلة مع السرعة ، طاقة الحركة ، والتحويل بين الكتلة والطاقة . وأن تصل إلى إجابات مسائل بسيطة تتضمن هذه النتائج .

4 أن تذكر الشروط التى عندها لابد من استخدام معادلات النسبية لوصف كتلة الجسيم وطاقة حركته .

5 أن تحسب قيم الطاقة المسموح بها (طبقًا لبلانك) بالنسبة لمتذبذب تردده الطبيعي معروف إذا كان ثابت بلانك معروفًا . وأن تشرح لماذا تبدو طاقة البندول متصلة .

6 أن ترسم منحنى بيانيًا لشدة الإشعاع مع λ بالنسبة لجسم ساخن وأن تبين كيفية تغير هذا المنحنى مع درجة الحرارة .

7 أن تصف الأثر الكهروضوئى وتبين ما المقصود بالمُشْرِف الكهروضوئى . وأن تذكر ما هى طاقة الفوتون بدلالة طوله الموجى . وأن تشرح كيف ينطبق مفهوم الفوتون على الأثر الكهروضوئى . وأن تحسب الطول الموجى الشرفى بمعرفة دالة الشغل . وأن تستخدم معادلة الأثر الكهروضوئى فى حالات بسيطة .

8 أن تصف أثر كومتون وتشرح كيف يمكن تفسيره بدلالة تطاير الفوتون .

9 أن تذكر العلاقة بين كمية تحرك فوتون و (أ) طاقته ، (ب) طوله الموجى و (جـ) تردده .

10 أن تذكر الطول الموجى لدى برولى بالنسبة لجسيم معروف الكتلة ويتحرك بسرعة معلومة . وأن تذكر السبب فى سهولة ملاحظة الخواص الموجية للإلكترونات ، بينما لا تلاحظ الخواص الموجية لكرة التنس مثلاً .

11 أن تصف تجربة دافيسون وجيرمر وتشرح كيف إنها حققت وجود موجات دى برولى .

12 أن تصف الحالات المستقرة لجسيم داخل أنبوبة ، وأن تفصِّل التنبؤات الجديدة للنظرية الموجية من حيث الموضع والطاقة . وأن تشرح السبب فى أن هذه التنبؤات لا تخرق التجارب المعروفة .

13 أن تشرح الظروف التى عندها لابد من إحلال ميكانيكا الكم محل الميكانيكا النيوتونية الكلاسيكية . وأن تصل إلى استدلال منطقى مستنبط من ظواهر التداخل التى لوحظت بالنسبة للضوء ، وأن تشرح سبب فشل الميكانيكا النيوتونية تحت هذه الظروف .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية

ثابت بلانك (h)

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

الطول الموجى لكومتون (λ_c)

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2.43 \times 10^{-12}\ \text{m}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

مناط الإسناد ذو القصور الذاتى

مناط الإسناد ذو القصور الذاتى هو الذى ينطبق عليه قانون نيوتن للقصور الذاتى ، وهو يعنى بالضرورة مناط الإسناد غير المتحرك بتسارع (بعجلة) .

فرضا نظرية النسبية

1 سرعة الضوء ثابتة بالنسبة لجميع الراصدين بغض النظر عن حركتهم النسبية بالنسبة لمصدر الضوء .

2 لا يمكن قياس السرعات المطلقة أبدًا . والسرعات المنسوبة إلى مناط معين هى فقط التى يمكن قياسها .

نتائج فرضي النسبية

1 قوانين الطبيعة ثابتة لا تتغير في جميع مناطات الإسناد ذات القصور الذاتي .

2 الأحداث التي ترصد على أنها متزامنة في مناط ذي قصور ذاتي قد لا تعتبر متزامنة في أي مناط ذي قصور ذاتي آخر يتحرك بالنسبة لأول .

3 لا يمكن تعجيل جسم ما ليصل إلى سرعة الضوء في الفراغ c .

4 لا يمكن أن تنتقل طاقة ما بسرعة أكبر من c .

القياسات الصحيحة للطول والزمن

هي تلك التي تكون فيها أجهزة القياس ساكنة بالنسبة للأجسام أو الأحداث المراد قياسها .

العلاقة بين القياسات الصحيحة وغير الصحيحة

الزمن : لو أن راصدًا يقيس الفترة الزمنية t بين حدثين يقعان في مناط ذي قصور ذاتي يتحرك بسرعة مقدارها v بالنسبة له أو لها ، فإن هذه الفترة الزمنية ستكون أطول من الفترة الزمنية الصحيحة t_0 ، التي يقيسها شخص ساكن بالنسبة للأحداث ويرتبط الزمنان المقاسان بالعلاقة :

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

الطول : لو أن راصدًا يقيس مسافة d بين نقطتين تتحركان بسرعة مقدارها v بالنسبة له أو لها ، فإن هذه المسافة ستكون أقصر من المسافة الصحيحة d_0 التي يقيسها شخص ساكن بالنسبة للنقطتين . وترتبط المسافتان المقاستان (بفرض أن v والنقطتين على خط واحد) بالعلاقة التالية :

$$d = d_0\sqrt{1-v^2/c^2}$$

خلاصة

1 إن استخدام لفظ « الصحيح » لا يعني قياسًا أكثر دقة من قياس « غير صحيح » إذا يفترض أن كلاً من القياسين قد تم بشكل « سليم » .

2 يطلق على المعامل الذي لا أبعاد له $\sqrt{1-v^2/c^2}$ ، معامل النسبية . وقيمته العددية واحد تقريبًا إلا إذا اقتربت v من c .

3 تتفق القياسات التي يجريها راصدون يتحرك بعضهم بالنسبة لبعض حول قيم سرعتهم النسبية v وسرعة الضوء c .

الكتلة النسبوية

إذا كانت كتلة جسم ما ساكن هي m_0 ، فإنه سيكتسب كتلة m أكبر عندما يرصد وهو يتحرك بسرعة v . ويربط بين m و m_0 العلاقة التالية :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

خلاصة

1 إن هذه الزيادة في الكتلة تقتضي ببساطة زيادة القصور الذاتي للجسم عندما يتحرك بسرعة كبيرة فعندما تقترب v من c فإن الأمر يتطلب قوة أكبر فأكبر لتغير سرعة ذلك الجسم .

الطاقة النسبوية

ترتبط طاقة جسم ما مع كتلته بالعلاقة $E = mc^2$ ، حيث تعتمد m على مقدار سرعة الجسم كما ذكرنا آنفا . وتكون طاقة الجسم الساكن هي $E_0 = m_0c^2$ وتعطى طاقة حركة الجسم بالعلاقة

$$\text{KE} = (m - m_0)c^2$$

خلاصة

1 عندما تكون v أقل كثيرًا من c فإن معادلة طاقة الحركة تختزل إلى المعادلة الكلاسيكية $\text{KE} = \frac{1}{2}mv^2$.

2 إن أية عملية من شأنها تغيير طاقة جسم ما بمقدار ΔE ، لابد وأن تكون مصحوبة بتغير فى الكتلة Δm ، تعطى بالعلاقة :

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

طاقة الفوتون

تبلغ طاقة فوتون من ضوء طوله الموجى λ (وتردده f) ما يلى :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hf$$

الأثر الكهروضوئى

تنبعث الإلكترونات من سطح فلز ما إذا سلط على ذلك السطح ضوء طوله الموجى أقصر من طول موجى مشرفى λ_0 ، يعتمد على مادة ذلك السطح .

دالة الشغل (ϕ)

هى الطاقة التى تربط الإلكترون بالسطح ، وهى تساوى طاقة فوتون من الضوء الذى له طول موجى مشرفى λ_0 :

$$\phi = \frac{hc}{\lambda_0}$$

جهد الإيقاف (V_0)

V_0 هو جهد الإبطاء اللازم لإيقاف أكثر الإلكترونات الضوئية طاقة والتى تنبعث نتيجة تسليط ضوء طوله الموجى أقصر من λ_0 .

المعادلة الكهروضوئية

eV_0 تساوى القيمة القصوى لطاقة حركة الإلكترونات الضوئية المنبعثة .

$$eV_0 = (\frac{1}{2}mv^2)_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - \phi$$

كمية تحرك الفوتون

كمية تحرك فوتون ما هى

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

والعلاقة بين طاقة الفوتونات وكمية تحركها هى

$$p = \frac{E}{c}$$

خلاصة

1 للفوتونات دائمًا سرعة ثابتة هى c ولذلك فخواصها غير كلاسيكية بطبعها وبالنسبة للفوتون فليس هناك معنى لمفهوم كتلة السكون .

تطاير كومتون

عندما ترتطم أشعة إكس بسطح ما ، فإن الطول الموجى للجزء الذى يتطاير منها بزاوية مقدارها θ بالنسبة لاتجاه السقوط ، يتزايد بمقدار ،

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

وتسمى الكمية h/m_ec بالطول الموجي لكومتون الخاص بالإلكترون . ويعزى الازدياد في الطول الموجي إلى التشتت المرن لفوتون أشعة إكس إلكترون والذي يفقد الفوتون من خلاله جزءًا من كمية تحركه .

الطول الموجي لدى برولي

للجسيم الذي كمية تحرك p طول موجي اقترحه دي برولي ويعطى بالمعادلة

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

خلاصة

1 حيث أن للثابت h قيمة غاية في الصغر ، لذا فالطبيعة الموجية للجسيمات المادية لا يمكن رصدها إلا إذا كانت كتلة الجسيم صغيرة للغاية .

2 تصبح الميكانيكا الكلاسيكية غير صالحة عندما يصير الطول الموجي لدى برولي مساويًا أو أكبر من أصغر أبعاد تجربة ما .

مبدأ اللايقين

هناك حدود لازمة للدقة التي نعرف بها كلاً من موضع وكمية تحرك جسيم ما . ويخضع حاصل ضرب مقداري اللايقين بالضرورة للمتباينة التالية :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

وهناك نتيجة لازمة لهذا المبدأ ، وهي علاقة مماثلة بين مقداري اللايقين في قياس الطاقة والفترة الزمنية اللازمة لقياس الطاقة :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

خلاصة

1 توضح هاتان المتباينتان أنه كلما ارتفعت دقة قياس إحدى الكميتين ، كلما قل ما نعرفه عن الكمية الأخرى .

2 لا ينشأ هذان المقداران للايقين من عيوب ما أو من حدود لدقة أجهزة القياس . إنهما قيود (أو حدود) أساسية توضع على ما نستطيع رصده حتى في أكثر التجارب كمالاً .

أسئلة وتخمينات

1 تخيل إنك في سفينة فضاء تنطلق بعيدًا عن الأرض بسرعة مقدارها 0.90 c وأن شعاع ليزر يصوب نحو السفينة من الأرض . فإذا قمت بقياس سرعة شعاع الليزر بالنسبة لسفينتك ، فكم ستكون سرعة الضوء ؟

2 تخيل أن لإحدى رائدات الفضاء طبقة صوت مثالية وأنها تستطيع التعرف على الفور على أن شوكة رنانة تصدر ترددًا يقع في مدى منتصف C عند طرقها . ما هو التردد الذى ستسمعه إذا استمعت إلى الشوكة الرنانة وهي داخل سفينتها الفضائية . بينما هي منطلقة عبر الفضاء بسرعة مقدارها 0.9 c ؟

3 يعيش معظم البشر لعمر أقل من 100 yr. . وحيث أن أقصى سرعة يمكن لشخص أن يكتسبها بالنسبة للأرض هي c . أي سرعة الضوء ، فإن الشخص الذي يغادر الأرض لن يبتعد عنها مسافة أبعد من مائة سنة ضوئية عبر الفضاء بعد أن يسافر مائة عام . هل يعني هذا بالضرورة أنه لن يسافر بشر من الأرض لأبعد من مائة سنة ضوئية ؟ (السنة الضوئية الواحدة هي المسافة التي يقطعها الضوء في سنة واحدة أو 9.46×10^{15} m) .

4 افترض أن سرعة الضوء ليست سوى 20 m/s ، وأن جميع نتائج النسبية سيتم تطبيقها بعد استعمال هذه السرعة بدلاً من c . ناقش الكيفية التي ستتغير بها حياتنا عندئذ .

5 يجب أن يكون واضحًا من دراسة هذا الفصل أن المقولة « المادة لا تفنى ولا تستحدث من العدم » مقولة زائفة . ماذا نستطيع أن نقول بدلاً منها ؟

6 ناقش الوضع الذى سيتأثر به عالمنا لو أن الطبيعة تغيرت بحيث صار ثابت بلانك أكبر مما هو بمقدار 10^{32} مرة . اعتبر الموقف من زاويتين مختلفتين : (أ) تكمية طاقة التذبذبات و (ب) مبدأ اللايقين .

7 كيف يفسر مفهوم الفوتون للضوء السمات التالية للأثر الكهروضوئى : (أ) الطول الموجى الحرج ، (ب) إن جهد الإيقاف يتناسب عكسيًا مع الطول الموجى ؟

8 كيف يمكن قياس دالة الشغل لفلز ما ؟ وكذلك ثابت بلانك ؟

9 اكتب قائمة بالتجارب التى يسلك فيها الضوء سلوك الموجات وقائمة أخرى تكون فيها طبيعته الكمية هى المهمة . هل هناك تجربة فى قائمتك ، يمكن تفسيرها من وجهتى النظر ؟

10 عندما يسطع ضوء على سطح عاكس فى الفراغ فإن ذلك السطح يتعرض لضغط ما من جانب الضوء . اشرح هذه الظاهرة . هل يختلف مقدار الضغط لو كان السطح أسود بحيث يمتص الضوء ؟

11 لو أمكن استغلال طاقة كتلة الوقود ، فما عدد الكيلو جرامات من الوقود ستلزم لتوفير الطاقة لمدينة بها نحو 300,000 نسمة فى عام كامل ؟

12 ما مقدار التغير فى القدرة بالنسبة لهوائى محطة إذاعة محلية عندما ينتقل من حالة طاقة تذبذب مكماة إلى حالة مجاورة ؟ ما هو الطول الموجى والتردد الذى يكون للفوتونات المنبعثة فى هذا التغير ؟

13 من المعروف أن الضوء فوق البنفسجى يسبب احمرار الجلد عند التعرض للشمس . اشرح السبب . يصر بعض الناس على أن جلودهم تحمر بسهولة أكبر إذا كانت مبتلة . هل ترى أى سبب لذلك ؟

مسائل

الأقسام من 1-26 إلى 3-26

1 تطير طائرة بسرعة مقدارها 360 m/s موازية لسطح الأرض . ثم سقط أحد المسامير من سقف الطائرة . أين يقع المسمار بالنسبة لنقطة تقع أسفل المكان الأصلى للمسمار مباشرة ؟ المسافة بين سقف الطائرة والأرضية 3.2 m .

2 تخيل أنك داخل مصعد يرتفع بسرعة ثابتة مقدارها 2.8 m/s . ثم أسقطت عملة معدنية من يدك ، من ارتفاع 1.4 m فوق أرضية المصعد . كم ستستغرق العملة من الوقت لكى تصل للأرضية ؟ أعد حساباتك إذا كان المصعد واقفًا .

3 يجرى قطاران جنبًا إلى جنب على قضبان متوازية . ويسبق أحد القطارين وليكن (أ) القطار الآخر (ب) بسرعة 1.2 m/s بينما يسير أحد الركاب نحو مقدمة القطار بسرعة 0.5 m/s ، بينما يسير أحد الركاب نحو مؤخرة القطار بسرعة 0.5 m/s . ما هما سرعتا الشخصين كما يرصدها راكب داخل القطار (ب) ؟

4 يتحرك قطار إلى الأمام ببطء وبسرعة 3 m/s. ويجرى داخل إحدى عربات القطار مسافر بسرعة 3 m/s نحو مؤخرة القطار ؟ (أ) ما هى سرعة المسافر كما يرصدها شخص يقف على رصيف المحطة ؟ (ب) وكم ستكون السرعة المرصودة لو أن المسافر عكس اتجاه سرعته ؟

5 قذف صبى داخل قطار يسير شرقًا بسرعته 16 m/s ، كرة نحو الغرب بسرعة 4 m/s . (أ) ما هى سرعة الكرة بالنسبة لشخص يقف ساكنا بالقرب من قضبان القطار ؟ وبالنسبة لمسافة داخل القطار ؟

■ 6 تخيل أنك على سطح القمر وتريد أن تضبط ساعتك على إشارة لضبط الوقت على الأرض ، وقد تلقيت رسالة بالراديو تقول أن الوقت هو الخامسة تمامًا بواسطة نغمة معينة . ما هو الوقت الذى تضبط عليك ساعتك فى لحظة النغمة ؟ خذ المسافة من القمر إلى الأرض على أنها 3.8×10^{8} m .

■ 7 عند السرعات المنخفضة فإن شخصًا ما يسير بسرعة v بالنسبة للأرض إذا اطلق مقذوفًا على طول خط حركته بسرعة مقدارها u بالنسبة لنفسه ، فإن سرعة المقذوف بالنسبة للأرض سيكون مقدارها ببساطة هو $u + v$. إلا أن هذا لن يكون صحيحًا إذا كانت السرعات نسبية وتقترب من c ، لأن الناتج سيكون أكبر من c . (فلو أن $v = 0.7\ c$ مثلا) ، $u = 0.6\ c$ ، لكانت السرعة المتوقعة 1.3 c بالنسبة للأرض وهو ما يعد مستحيلا طبقًا لنظرية النسبية الخاصة) . وقد أثبت أينشتين أن السرعة النسبية تعطى بالعلاقة : $\frac{u+v}{1+uv/c^2}$

فإذا كانت سفينة فضاء تتحرك بسرعة مقدارها $v = 0.7\ c$ وأطلقت قذيفة في نفس خط حركتها بجوار الأرض وبسرعة مقدارها $u = 0.8\ c$ ، فكم تكون سرعة المقذوف النسبية بالنسبة للأرض ؟

■ 8 في ضوء نفس الظروف المذكورة في المسألة رقم 7 ، تخيل أن رائد فضاء داخل سفينة الفضاء يرسل نبضة ضوئية . أوجد مقدار سرعة هذه النبضة بالنسبة للأرض . (قبل أن تقوم بحل المسألة ، هل تستطيع أن تعطى الإجابة من اعتبارات فروض النسبية الخاصة ؟) .

القسم 4–26

9 تخيل أنك في رحلة عبر الفضاء داخل سفينة فضائية تتحرك بسرعة مقدارها 0.88c . وعندما تستعمل ساعة إيقاف جيدة فإنك تجد معدل النبض لديك 68 نبضة في الدقيقة . كم يكون معدل النبض لديك إذا تم قياسه (أ) بواسطة زميل لك في الرحلة داخل السفينة ، (ب) بواسطة شخص على سطح الأرض ؟

10 منحت رائدة فضاء تحت التمرين تصريحاً بأن تؤدى اختبار الفيزياء الذى مدته 2.0 h أثناء وجودها داخل سفينة الفضاء التى تنطلق بسرعة مقدارها 0.92 c بالنسبة للأرض . ما المدة التى سيسمح لها بها بواسطة ملاحظ (أ) معها بالسفينة ، (ب) موجود على الأرض ؟

11 وجد أن الزمن الدورى لبندول بسيط هو 2 s عندما يقاس فى مناط إسناده ذى القصور الذاتى . وعندما مر مشاهد بجوار البندول متحركًا بسرعة كبيرة جدًا وقاس الزمن الدورى لنفس البندول وجده يساوى 6 s ما هو مقدار سرعة المشاهد ؟

■ 12 افترض أن سفينة الفضاء « إنتربرايز » قد زودت بهوائى دوّار ويكمل دورة كاملة فى 0.5 s كما تقاس من داخل السفينة . فإذا كانت السفينة تنطلق بعيدًا عن الأرض بسرعة مقدارها 0.84 c ، فكم تكون الفترة التى تستغرقها دورة كاملة للهوائى طبقًا لمشاهده راصد على الأرض ؟

13 تتحلل مادة غير مستقرة بحيث يفقد نصفها في 960 يومًا . فإذا وضعت هذه المادة داخل سفينة فضاء تسافر بسرعة مقدارها 0.90 c ، فكم يستغرق انحلال نصف المادة طبقًا (أ) لشاهد داخل سفينة الفضاء و (ب) لشاهد على سطح الأرض ؟

■ 14 البيون هو جسم دون نووى ويبلغ عمره 2.6×10^{-8} s . ما هى سرعة حزمة من البيونات تقطع مسافة مقدارها 20 m داخل المعمل قبل انحلالها ؟

■ 15 اكتشف العلماء فى أحد معامل الأبحاث نوعًا جديدًا من حزم الجسيمات التى تنطلق لمسافة 5.6 m قبل أن تتحلل الجسيمات . وقد وجد أن مقدار سرعتها فى المعمل هو 0.9880 c . ما هو عمر هذه الجسيمات الجديدة عندما ترصد وهى ساكنة فى المعمل ؟

■ 16 زار الكابتن بيكارد الذى يبلغ من العمر أربعين سنة ، أخاه الأصغر الذى عمره ثلاثون سنة ، قبل أن ينطلق فى رحلة داخل سفينة الفضاء « إنتربرايز » . وبعد مرور ثلاث سنوات حسب الساعات الموجودة داخل سفينة الفضاء ، يعود الكابتن بيكارد فيجد أخاه يحتفل بعيد ميلاده الخامس والأربعين . ما هى المدة التى تغيبها حسب الساعات الأرضية ؟ وما متوسط السرعة التى سافر بها خلال الرحلة ؟

القسم 5-26

17 يبلغ طول سفينة فضاء حين يقاس على سطح الأرض 40 m . كم سيكون طول السفينة عندما يقاس بواسطة مشاهد على الأرض يرى السفينة وهى تمرق بجوار الأرض بسرعة مقدارها (أ) $0.3\,c$ و (ب) $0.9885\,c$ ؟

18 يقيس مشاهد طول عصا مترية عندما يكون المشاهد ساكنًا والعصا تنطلق أمامه بسرعة كبيرة موازية لطوله . وكانت نتيجة القياس هى 0.6 m . ما هى سرعة العصا ؟

19 يتحرك جسيم دون - نووى داخل جزء مستقيم طوله 25 m من مسارع الجسيمات فى أحد معامل الأبحاث ، وبسرعة مقدارها $0.9880\,c$. ولو تخيلت أنك تطير مع هذا الجسم فكم سيكون طول الجزء المستقيم من المعجل بالنسبة لك ؟

20 مكعب طول ضلعه 4 cm عندما يكون ساكنًا . ثم أطلق المكعب ليتحرك بسرعة كبيرة مقدارها $0.82\,c$ موازيا ؟ لأحد أضلاعه . (أ) ما هو شكل المكعب بالنسبة لمشاهد يقف ساكنًا ؟ (ب) ما هو حجمه المُشاهَد عندما يندفع عبر المعمل ؟

■ 21 يبعد أقرب نجم من الأرض 4.1×10^{16} m تقريبًا . فإذا سافرت بسرعة مقدارها $0.84\,c$ فى سفينة فضاء ، فكم من الوقت تستغرق الرحلة إلى ذلك النجم (أ) كما يراه مشاهد يقف ساكنًا على الأرض ؟ و (ب) كما يراه مشاهد موجود داخل السفينة ؟

■ 22 تتحرك سفينة فضاء بسرعة مقدارها $0.92\,c$ بالنسبة لمنصة فضائية بها طريق للهبوط طوله 6000 m . ما هو طول ذلك الطريق كما يقيسه مشاهد داخل السفينة أثناء طيرانها أمام المنصة الفضائية ؟

■ 23 تتحرك شاحنة نصف نقل طولها 5 m بسرعة مقدارها 100 km/h . ما هو طول الشاحنة كما يبدو لمشاهد يقف ساكنًا على جانب الطريق ؟ **تلميح** : بالنسبة للحالة التى تكون فيها $v/c \ll 1$ ، يمكنك استخدام التقريب $\sqrt{(1-v^2/c^2)} = 1 - v^2/2c^2$.

■ 24 تخيل أنك قمت بقياس طولى سفينتين فضائيتين ، أحداهما ساكنة والأخرى تتحرك بسرعة مقدارها $0.92\,c$ ، وأنك وجدت طوليهما متساويين . وكان صديق لك مسافرًا داخل السفينة المتحركة . أوجد النسبة بين طولى السفينتين كما يراها صديقك . واعتبر أنك تقف ساكنًا على سطح الأرض .

القسم 6-26

25 ما هى السرعة التى تكون كتلة جسيم فيها أكبر مائة مرة من كتلة سكونه ؟

26 كتلة سكون الإلكترون هى $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}$ kg . أوجد النسبة m/m_0 لإلكترون عندما يكون مقدار سرعته (أ) $0.1\,c$ ، (ب) $0.001\,c$ ، (جـ) $0.6\,c$ و (د) $0.99\,c$.

27 أوجد كتلة وسرعة إلكترون تم تعجيله فى فرق للجهد مقداره (أ) 300 V و (ب) 30.000 V .

28 أوجد طاقة حركة إلكترون عندما يكون متحركًا بالسرعات المذكورة فى الأجزاء من (أ) إلى (د) فى المسألة رقم 26 .

29 ما هى سرعة جسيم طاقة حركته 8 أضعاف طاقة كتلة السكون لديه ؟

■ 30 تعجل الجسيمات فى المعجلات النووية الحديثة أحيانًا لطاقات مرتفعة للغاية . (أ) احسب كتلة بروتون طاقة حركته 6×10^9 eV . (ب) وما هى سرعته ؟ اعتبر كتلة سكون البروتون m_0 مساوية 1.67×10^{-27} kg .

31 افترض أن 100 g من المادة قد تحولت تمامًا إلى طاقة . (أ) ما مقدار الطاقة الناتجة ؟ (ب) وإذا استخدمت هذه الطاقة فى تشغيل مصباح قدرته 75 W ، فما الفترة التى يظل فيها مشتعلاً ؟

32 تتطلب إذابة 1.0 kg من الثلج طاقة مقدارها 334 kJ تقريبًا . ما هى النسبة المئوية للزيادة فى كتلة الثلج بسبب الطاقة التى أضيفت لإتمام عملية الذوبان ؟

33 عند حرق 2.0 g من الـهيدروجين مع 16 g من الأكسجين يتكون 18 g من الماء . وينتج عن هذا التفاعل الكيميـائي طاقـة مقدارها 572 kJ تقريبًا . ما مقدار الكتلة المفقودة في هذه العملية الكيميائية ؟ وهل يمكن اكتشاف التغير في الكتلة ؟

القسم 7-26

34 احسب الطاقة ، مقدرة بالإلكترون فولت وبالجول لفوتون ينتمي إلى (أ) تردد موجة لاسلكية 95 MHz و (ب) ضوء فوق بنفسجي 10^{16} Hz .

35 احسب طاقـة فوتـون ـ مقدرة بالإلكترون فولت وبالجول ـ إذا كان طـوله الموجي (أ) 5 cm ، (ب) 955 nm ، (جـ) 489 nm و (د) 10 nm .

36 أوجد الطول الموجي لفوتون طاقته (أ) 3 eV ، (ب) 3 keV و (جـ) 1.2 MeV .

37 متوسط طاقة الحركة الحرارية الانتقالية لجسيم ما $\frac{3}{2}kT$. (أ) ما هو الطول الموجي لفوتون يكافئ هذه الطاقة الحراريـة عند 30°C ؟ (ب) ما نوع الإشعاع الناتج ؟

■ 38 تسقط كرة مصمتة كتلتها 1 kg من ارتفاع 5 m . فلو أمكن تحويل كـل طاقـة تلـك الكـرة إلى فوتونـات ضـوء مرئـي طولـه الموجي 589 nm فكم يكون عدد تلك الفوتونات ؟

■ 39 ما هو الارتفاع الذي على الكرة المذكورة في المسألة السابقة السقوط منه حتى يكون لـها طاقة فوتون واحد طوله الموجي 434 nm ؟

■ 40 ينبعث من ليزر هليوم ـ نيون قدرته 0.5 mW إشعاع طوله الموجي 633 nm . (أ) ما هي طاقة فوتون في هذا الإشعاع ؟ (ب) كم عدد الفوتونات المارة بنقطة معينة في الحزمة في الثانية الواحدة ؟

القسم 8-26

41 الطول الموجي الحرج للإنبعاث الكهروضوئي مـن مادة معينة هـو 432 nm . أوجد دالة الشغل لـهذه المادة (مقدرة بالإلكترون فولت) .

42 ما هي دالة الشغل (بالإلكترون فولت) لمادة طولـها الموجي المشرفي 465 nm ؟

43 دالة الشغل للفضة هي 4.74 eV . (أ) ما هو الطول الموجي المشرفي للفضة ؟ (ب) في أي مناطق الطيف يقع هذا الطول الموجي ؟

■ 44 فلز ما ، دالة الشغل له قيمتها 1.25 eV . ويسقط ضوء أصفر طوله الموجي 589 nm على سطح ذلك الفلز .
أوجد (أ) طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة من السطح و (ب) الطول الموجي المشرفي لذلك الفلز .

■ 45 يسطع ضوء طوله الموجي 434 nm على سطح مادة دالة شغلـها 1.4 eV . ما هي سـرعة أكـثر الإلكترونـات المنبعثـة مـن السطح طاقة ؟

■ 46 يسقط ضوء مجهول طوله الموجي على سطح الصوديوم الذي دالة شغله 2.3 eV . والسرعة القصوى للإلكترونـات الضوئيـة المنبعثة من السطح هي 1.2×10^6 m/s . ما هو الطول الموجي لـهذا الضوء ؟

■ 47 عندما يسلط ضوء تردده 1.3×10^{15} Hz على سطح مادة ما ، فإن جهد الإيقاف الذي تم قياسه للإلكترونات الضوئية هـو 2.4 V . (أ) ما هي دالة الشغل لـهذه المادة ؟ (ب) وما هو التردد المناظر للطول الموجي المشرفي ؟

■ 48 يسطع إشعاع طولـه الموجـي 340 nm علـى سـطح البوتاسـيوم (دالـة الشغـل لـه 2.3 eV) . احسـب جـهد الإيقـاف الكهروضوئي في هذه الحالة .

■ 49 تبلغ طاقة تفكك (أي الطاقة اللازمة لفصـل الـذرات المكونـة للجـزئ عـن بعضـها البعـض) جـزئ CN (سـيانوجين) 1.22×10^{-18} J تقريبًا . (أ) ما هو أقصى طول موجي لإشعاع يمكنه فصل ذرات الجزء CN عن بعضها ؟ (ب) وما هو تردد هذا الإشعاع ؟ (جـ) وفي أي مناطق الطيف يقع هذا الإشعاع ؟

القسم 9-26

50 (أ) ما هي كمية تحرك فوتون طاقته 16 eV ؟ (ب) ما هو وجه المقارنة مع كمية تحرك إلكترون طاقته 16 eV ؟

51 أوجد مقدار الدفع الذى يؤثر به فوتون طوله الموجى 486 nm على سطح ما عندما (أ) يتم امتصاصه (ب) ينعكس مرتدًا من السطح .

52 احسب الكسر النسبى للطول الموجى لكومتون ، $(\lambda'-\lambda)/\lambda$ بالنسبة لفوتون يتصادم مع إلكترون حر تصادمًا بالمواجهة ، ثم يتطاير مرتدًا إلى الخلف مباشر إذا (أ) $\lambda = 489$ nm و (ب) $\lambda = 0.45$ nm .

■ 53 يضرب فوتون طوله الموجى 0.45 nm إلكترونًا حرًا ساكنًا ، ثم يتشتت مرتدًا إلى الخلف مباشرة . ما هى سرعة الإلكترون بعد التصادم ؟ وهل يكون الإلكترون نسبويًا ؟

■ 54 يبعث ليزر هليوم ـ نيون قدرته 0.5 mW ، بضوء طوله الموجى 633 nm فى حزمة مساحة مقطعها المستعرض $3.6\ mm^2$. (أ) أوجد عدد الفوتونات التى تضرب سطحًا متعامدًا مع الحزمة فى الثانية . ما هى القوة التى تؤثر بها الحزمة على السطح ؟ (ب) عندما يتم امتصاصها تمامًا و (جـ) عندما تنعكس كلية ؟

■ 55 تصطدم فوتونات أشعة إكس طولها الموجى 0.800 nm بإلكترونات حرة فى هدف من الكربون . (أ) أوجد الطول الموجى للفوتونات المتطايرة التى تخرج بزاوية مقدارها $90°$ بالنسبة لاتجاه الإشعاع الساقط . (ب) ما مقدار كمية التحرك التى يتم نقلها إلى الإلكترونات الحرة ؟

56 عندما يتطاير فوتون لأشعة إكس طولها الموجى 0.680 nm من إلكترون حر ساكن ، فإن الإلكترون يرتد بسرعة مقدارها 1.2×10^6 m/s . (أ) كم بلغ الاختلاف $\Delta\lambda$ لكومتون فى الطول الموجى للفوتون ؟ (ب) عند أية زاوية يمكن رؤية الفوتون المتطاير ؟

القسمان 10-26 و 11-26

57 أوجد الطول الموجى لدى بروك لإلكترون عُجّل من السكون خلال فرق للجهد مقداره 1200 V .

58 ما هو الطول الموجى لدى بروك لبروتون يتحرك بسرعة مقدارها (أ) 10^4 m/s ، (ب) 10^6 m/s ؟

59 ما هو الطول الموجى لدى بروك لسيارة تزن 1600 kg وتتحرك بسرعة مقدارها 120 km/h ؟

60 ما هى سرعة جسيم الطول الموجى لدى بروك له 0.4 nm لو كان هذا الجسيم (أ) إلكترونًا و (ب) بروتونًا ؟

61 ما هو فرق الجهد المطلوب لتعجيل إلكترون من السكون حتى يتخذ طول دى بروك الموجى 6×10^{-9} m ؟

62 عجل جسيم الفا (وهو نواة هليوم كتلتها $m = 4 \times 1.67 \times 10^{-27}$ kg وشحنتها $(q = +2e)$ من السكون خلال فرق للجهد مقداره 1500 V . ما هو طول دى بروك الموجىَ لجسيم ألفا هذا ؟

■ 63 متوسط طاقة حركة إلكترون حر داخل فلز ما يعطى بالعلاقة $\frac{3}{2}kT$ عند درجات الحرارة المرتفعة . (أ) ما هو طول دى بروك الموجى لإلكترون حر فى فلز عند 27°C ؟ (ب) عند أية درجة حرارة يصبح طول دى بروك الموجى للإلكترون 0.8 nm ؟

■ 64 تم تعجيل إلكترون من السكون خلال فرق جهد V (بالفولت) . إثبت أنه عند إهمال الآثار النسبوية ، فإن طول دى بروك الموجى للإلكترون يمكن التعبير عنه كما يلى : $\lambda\,(\text{nm}) = \frac{1.228}{\sqrt{V}}$ (بوحدات نانومتر) .

القسم 12-26

65 اعتبر أن هناك إلكترونًا محصورًا داخل صندوق جهد ذى بعد واحد $L = 0.53$ nm (أ) احسب الأطوال الموجية الثلاثة الأولى الرنينية للإلكترون . (ب) احسب طاقة مستويات الطاقة الثلاثة الأولى للإلكترون .

66 بروتون محصور فى صندوق ذى بعد واحد عرضه 1.0×10^{-5} nm (وهو ما يقابل حجم نواة ذرية تقريبًا) . أوجد طاقة المستويات الثلاثة الأولى للبروتون فى الصندوق .

67 يبلغ أدنى مستوى طاقة لإلكترون محصور فى صندوق ذى بعد واحد 4 eV . وطاقة المستوى التالى له $(n = 2)$ هى 15 eV . أوجد الطول التقريبى للصندوق .

68 علقت كتلة مقدارها 100 g من طرف زنبرك ذى ثابت زنبرك مقداره 0.040 N/m . (أ) ما هو تردد الذبذبة الطبيعى لهذا النظام ؟ (ب) ما مقدار فجوة الطاقة بين قيم الطاقة المسموح بها بالنسبة لهذا المتذبذب ؟ عبر عن إجابتك بالجول وبالإلكترون فولت .

69 يسلك جزئ بروميد الهيدروجين فى كثير من الوجوه ، مسلك متذبذب (على هيئة كرتين مرتبطتين معًا بواسطة زنبرك وتهتزان جيئة وذهابًا) تردده الطبيعى 8.66×10^{13} Hz ، أوجد بالإلكترون فولت وبالجول ، فجوة الطاقة بين مستويات الطاقة المسموح بها لهذا المتذبذب .

■ 70 يبلغ أدنى مستوى للطاقة (ويسمى أيضًا طاقة نقطة الصفر) لمتذبذب توافقى مكمى معين 6 eV . (أ) ما هو تردد هذا المتذبذب ؟ (ب) ما هى فجوة الطاقة بين مستويات الطاقة المسموح بها لهذا المتذبذب ؟

■ 71 أوجد طاقة نقطة الصفر (طاقة أدنى مستوى) لجزئ NO إذا أمكن اعتباره متذبذبًا توافقيًا تردده الطبيعى 5.63×10^{13} Hz .

القسم 13-26

72 تنطلق كرة بيسبول كتلتها 15 g بسرعة مقدارها 24 m/s . إذا كانت سرعتها يمكن أن تقاس بدقة تصل إلى 0.5 بالمائة فما هو أدنى « لايقين » فى موضعها ؟

73 حجز إلكترون فى منطقة داخل 0.53 nm . ما مقدار اللايقين فى قياس كمية تحركه ؟

74 تبلغ طاقة إلكترون فى ذرة ما نحو 2.3 eV . ما هو أدنى وقت يلزم لقياس هذه الطاقة بدقة تصل إلى 0.5 بالمائة ؟

75 لدينا بروتون محصور داخل نواة نصف قطرها النموذجى 5×10^{-15} m تقريبًا . فإذا اعتبرنا هذا المقدار على أنه مقدار اللايقين فى وضع البروتون ، فكم سيكون أدنى مقدار للايقين فى كمية تحرك البروتون ؟ وفى طاقته بالإلكترون فولت ؟ اعتبر البروتون غير نسبوى .

76 بروتون معين طاقة حركته 5 MeV . إذا افترضنا أن كمية تحرك البروتون يمكن قياسها بمقدار 1% من اللايقين ، احسب مقدار اللايقين فى موضعه . **تلميح :** يمكن اعتبار البروتون الذى طاقته 5 MeV غير نسبوى .

■ 77 تستغرق ذرة ما ما يقرب من 1×10^{-9} s لكى تطلق فوتونًا طوله الموجى 510 nm . ما مقدار اللايقين فى طاقة هذا الفوتون ؟

■ 78 إذا كان مقدار ثابت بلانك 66 J.s بدلاً من 6.63×10^{-34} J.s فكم سيكون الطول الموجى لدى برولى بالنسبة للاعب بيسبول يزن 80 kg ويجرى بسرعة مقدارها 6 m/s ؟ وما مقدار اللايقين بالتقريب فى موضع اللاعب بالنسبة لحكم المباراة الذى يحاول أن يطلق النداء الصحيح عند لوح « البيت » ؟

مسائل عامة

■■ 79 تخيل أن كائنات متفوقة تعيش على كوكب بالقرب من النجم الفا سنتورى الذى يبعد عن الأرض بنحو 4.1×10^{16} m ، ويريدون أن يبعثوا سفينة فضائية نحو الأرض بسرعة مقدارها 0.9970 c . وكانت السفينة ملوثة بزوج من الجراثيم التى تتكاثر بحيث يتضاعف عددها كل 8.4×10^{5} s . كم يبلغ عدد الجراثيم على تلك السفينة عندما تمر بالأرض ؟ اجب لو أن هذا العدد يتم رصده بواسطة كائنات فى السفينة أو من فوق سطح الأرض .

80 الطرق فى منطقة أيوا الريفية مصممة بحيث تكون فى الغالب متجهة من الشمال للجنوب أو من الشرق للغرب وبين كل اثنين منها 1.6 km . (أ) إذا حلقت طائرة باتجاه الغرب فوق منطقة ريفية ، فإن الطرق الممتدة من الشمال للجنوب ستبدو وكأن بينها مسافة 1.0 km فقط . ما هى سرعة طيران الطائرة ؟ (ب) إذا نظر أحد سكان أيوا إلى أعلى نحو الطائرة عندما تحلق فوقه لوجد أن طولها 20 m . ما هو طول الطائرة عندما تكون ساكنة على أرض المطار ؟ (جـ) يحمل أحد المسافرين على الطائرة ساعة معقدة لقياس الزمن الذى تستغرقه الطائرة لكى تنتقل من طريق إلى الذى يليه . ما هو الوقت الذى ستبينه تلك الساعة ؟ (د) ويقوم أحد سكان أيوا بقياس الوقت الذى تستغرقه الطائرة لتنتقل من طريق إلى الذى يليه . فما هو هذا الوقت ؟

81 يبعد النجم الفا سنتورى عن الأرض 4.1×10^{16} m . تخيل أن سفينة فضاء يمكن إرسالها إلى هذا النجم بسرعة مقدارها 2.1×10^{8} m/s . (أ) ما الوقت الذى تستغرقه هذه الرحلة طبقًا للساعات الأرضية ؟ (ب) ما هو الزمن الذى تسجله الساعات الموجودة داخل السفينة لهذه الرحلة ؟ (جـ) ما هى المسافة التى سيقيسها ركاب السفينة بين الأرض والنجم ؟ (د) كم ستبلغ السرعة الظاهرية للسفينة كما يحسبها ركاب السفينة بناء على نتائج الجزئين (ب) و (جـ) ؟

82 يزن مكعب مصمت طول ضلعه 1 m عشرة كيلو جرامات 10 kg . افترض أن المكعب يتحرك بسرعة مقدارها 0.88 c موازيًا لأحد أضلاعه . (أ) ما مقدار كثافة المكعب (الكتلة لوحدة الحجوم) بالنسبة لمشاهد يتحرك مع المكعب ؟

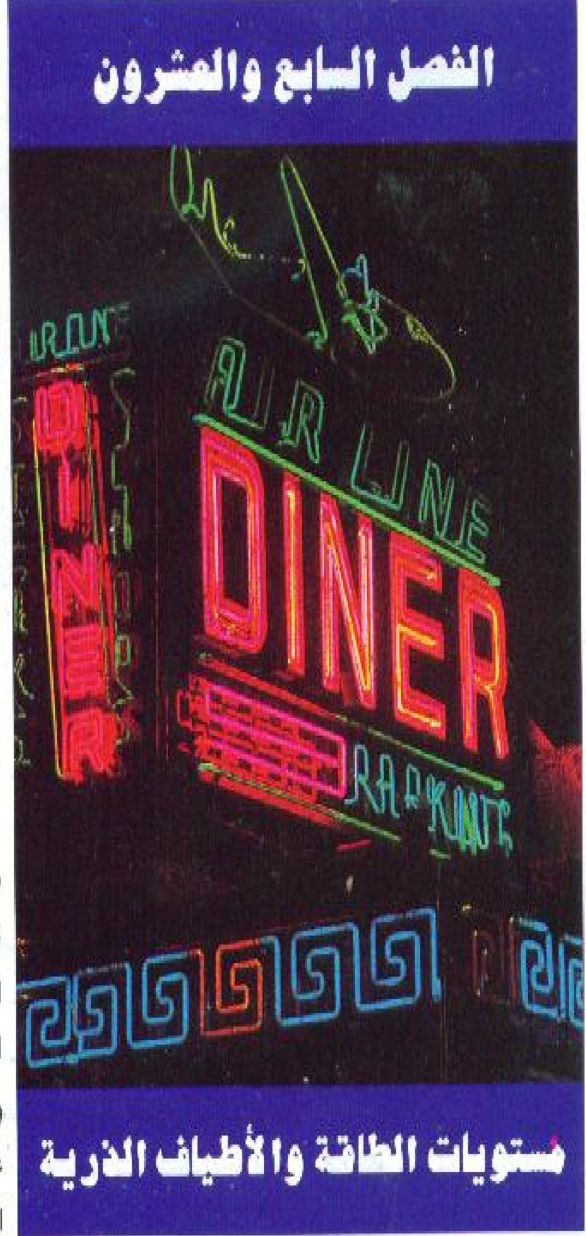
83 أرسل بعض سكان الفضاء الخارجي الذين يستقلون سفينة فضاء تقترب من الأرض بسرعة مقدارها 0.4 c ، مجسًا نحو الأرض . وسجل المشاهدون على سطح الأرض سرعة السفينة على أنها 0.5 c . ما هى سرعة المجس التى تقاس من على سفينة الفضاء ؟ **تلميح** : انظر المسألة رقم 7 .

84 يصل معدل الطاقة الشمسية التى تدخل إلى طبقات الجو العليا للأرض نحو 1.8×10^{17} W تخيل أن كل هذه الطاقة قد امتصتها الأرض وحولتها إلى كتلة . ما هى الزيادة فى كتلة الأرض على مدى فترة زمنية تصل إلى مائة عام ؟

85 ما قيمة أقصى جهد يكون معه التعبير الخاص بالطول الموجى المشتق فى المسألة 64 صحيحًا فى حدود دقة تصل إلى 5 بالمائة ؟

الفصل السابع والعشرون

مستويات الطاقة والأطياف الذرية



تميزت السنوات الخمس من 1923 إلى 1928 بأهمية استثنائية فى الفيزياء . ففى عام 1923 أوضح اكتشاف الخواص الموجية للجسيمات الطريق نحو فهم كيفية سلوك الإلكترونات داخل الذرات . وبحلول عام 1928 ، وبفضل تمثيل شرودنجر للميكانيكا الموجية لم يعد تركيب مستويات الطاقة الذرية والطريقة التى تقوم فيها الذرات بإشعاع الضوء وامتصاصه ، غامضًا على الإطلاق وسندرس فى هذا الفصل كيف فسر التصور الموجى الشئون الداخلية للذرات .

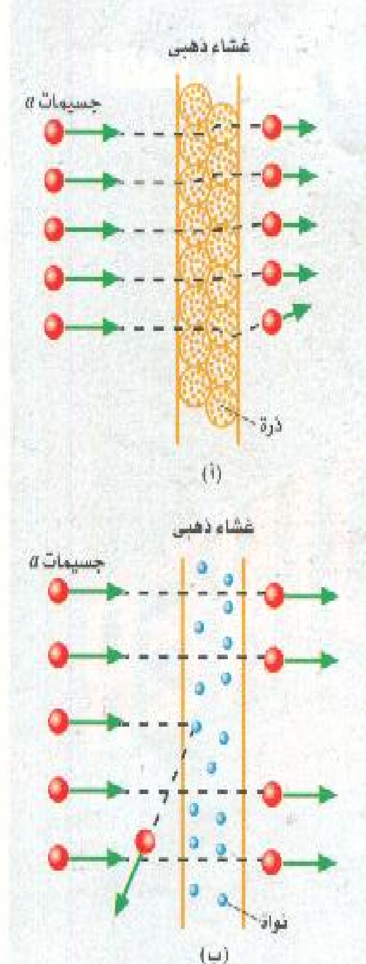
27-1 التاريخ الحديث للذرات

على الرغم من وجود الكثير من التكهنات حول الذرة ، إلا أن الأمر استدعى الانتظار حتى عام 1911 حين أُقر النموذج النووى للذرة ، فقد تمكن فى ذلك العام العالم أرنست رذرفورد ومعاونوه من إجراء التجربة الموضحة تخطيطيًا فى الشكل 1-27 . وقد استخدم الجسيمات المنبعثة من عنصر الراديوم المشع كقذائف . وكانت تلك الجسيمات ـ جسيمات ألفا (α) ، وهى ما تعرف الآن بأنها نوى ذرات الهليوم . لقد صوبت حزمة من تلك الجسيمات نحو غشاء رقيق من الذهب لم يكن سمكه يزيد على بضع مئات من الذرات .

وقد توقع رذرفورد النتيجة المبينة فى الجزء (أ) ، فكما تخترق الرصاصات لوحًا من الورق المقوى ، فإن المتوقع أن تقوم الذرات بإبطاء الجسيمات أو قد تسبب لها انحرافًا

طفيفًا . على أن النتيجة بدلاً من هذا كانت كما يوضح الجـزء (ب) من الشكل : على الرغم من أن معظم الجسيمات لم يسبب لها الغشاء أي انحراف ، فإن عددًا قليلاً جـدًا منها قد انحرف بشدة كما لو كانت قد ارتطمت بجسم ضئيل للغاية ولكنه ثقيل جدًا في نفس الوقت . وقد استغل رذرفورد هذه المشاهدات ووضع المفـهوم الحديث حـول الـذرة وهو ما يعرف **بالذرة النووية** .

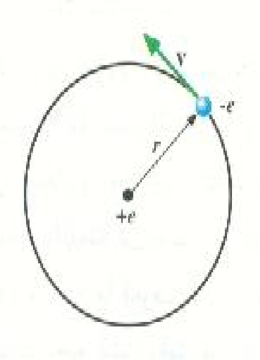
توجد عند مركز الذرة **نواة** ضئيلة جدًا : حيث يبلـغ نصف قطرها نحـو 10^{-15} m ويتركز فيها نحو 99.9 بالمائة من كتلة الذرة . وتحمل النواة شحنة موجبة مقدارها Ze ، حيث e هي القيمة المطلقة لشحنة الإلكترون ، أما Z فهي العدد الذري للعنصر المعني ؛ وهو يساوي عدد البروتونات داخل النـواة ($Z = 1$ للـهيدروجين و 2 للـهليوم ، و 3 لليثيوم ، وهلم جرًا) . ونصف قطر الذرة يقترب من 40,000 مرة قدر نصف قطر النـواة ولذلك فإن النواة هي في الحقيقة نقطة ضئيلة عند مركز الـذرة . ويـدور Z إلكـترون في الفضاء الرحب للذرة خارج النواة وهي تحمل من الشحنة ما مجموعه $-Ze$ وبـهذا تكون الذرة متعادلة كهربيًا . وقد أصبحنا حاليًا نعرف أن الطبيعـة الموجية للإلكترون تغلب على طبيعته الجسيمية فيما يتعلق بتحديد الخواص الفيزيائيـة للـذرة ، وكما نـرى فإن حجم الذرة هو في الغالب خاوٍ .



شكل 27-1:
قذف رذرفورد جسيمات α عبر غشاء رقيق من الذهب . (أ) التنبؤ الأصلي لما يمكن أن يحدث . (ب) المفهوم المطلوب لتفسير النتائج التجريبية .

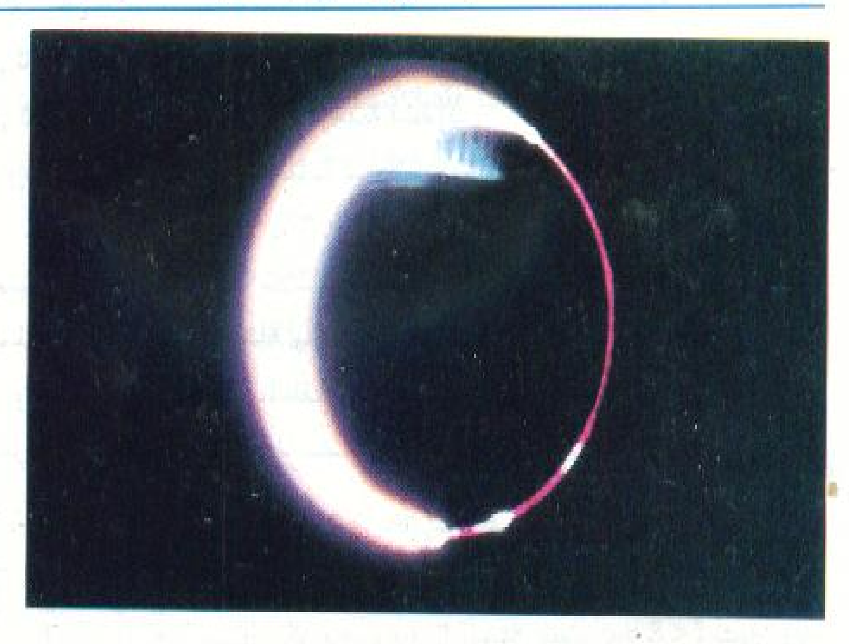
وأبسط الذرات جميعًا ، ذرة الـهيدروجين التي تتكون من بروتون منفـرد هـو بمثابة النواة والكترون منفرد ، والنمـوذج المبين فـي الشكـل 27-2 يتفق مـع نتـائج رذرفورد فالإلكترون يدور حول النواة ، وتقوم قوى كولوم للتجاذب المؤثرة عليه من جـانب النـواة بتحقيق قوة الجذب المركزي المطلوبة . علـى أن مثـل هـذا النمـوذج لابـد أن يـؤدي دور هوائي موجات كهرومغناطيسية لأنه يشبه كثيرًا ثنائي قطب متذبـذب . فإذا قـام بـهذا الدور فإن الـذرة لابـد أن « تتـهاوى » عندما تفقد طاقة بالإشعـاع ، ومـن ثـم يتحـرك الإلكترون في مسار حلزوني إلى أن يصطـدم بـالنواة . إلا أن ذرات الـهيدروجين لا تسلك هذا المسلك ، إذ إنها ـ في العادة ـ لا تشع طاقـة ، ولا يبـدو عليـها مطلقـا أنـها تفنـى ومعنى هذا أن النموذج المطروح لابد أن يكون خاطئًا بشكل أو بآخر .

على أن ذرات الـهيدروجين قد يمكن حثها على إطلاق إشعاع تحـت ظـروف معينـة وقد ثبت لسنين عديد قبل 1900 أن الغازات بل وحتى الجوامد المتبخرة يمكن جعلـها تشع ضوءًا (أي يمكن **إستثارة** ذراتها) وذلك بإمرار شرارة كهربية أو تفريغ جهد مرتفع خلالـها . (غاز النيون المستعمل في الإعلانات ـ مثلاً ـ يشع ضوءًا أحمـر عنـد حـدوث تفريغ غازي بواسطة قطبي جهد مرتفع عند طرفي الأنبوبـة) . ويمكـن دراسـة الأطـوال الموجية للضوء المنبعث من هذه الغازات الساخنة ، أي طيفـها باستخدام إسبكترومتر (مطياف) كالذي نوقش في القسم 25-6 وبيّنه الشكل 25-17 .



شكل 27-2:
النموذج الكلاسيكي لـذرة الـهيدروجين . ويصور الإلكترون على أنه يتحرك في مدار دائري حول النواة ذات البروتون الوحيد .

لقد تم قياس الخطوط الطيفية المنبعثة من كثير من الذرات بالتفصيل حتى قبل عـام 1900 . على أن العلماء ـ لعدم معرفتهم بتركيب الذرات ـ لم يكونوا قادرين علـى تقديـم تفسير ذي معنى لتلك الأطياف . فذرات الـهيدروجين مثلاً ، وليس H_2 لها أبسط الأطياف



يصبح الكروموسفير (الغلاف اللونـــى) الأحمر للشمس مرئيًا عند حدوث كســوف الشمس ، كما يظهر عند الحافة اليمنـــى فى هذه الصورة . ويعــود الســبب فــى ظهور اللون الأحمر إلى خــط الانبعــاث الأحمر القوى لغاز الهيدروجين .

حيث يتكون الجزء المرئى من الطيف المنبعث للهيدروجين من سلسلة خطوط الطيف التى يوضحها الشكل 27-3 . (لاشك أنك تذكر من القسم 25-6 أن خط الطيف ما هـو فى الحقيقة إلا صورة لفتحة الإسبكترومتر ، ولكل طـول موجى صـورة منفصلة) . ولم يتيسر رؤية الخطوط الواقعة فى المنطقة فوق البنفسجية من الطيف إلا بواسطة الصور الفوتوغرافية ـ بالطبع ـ لأن العين البشرية غير قادرة على إبصار الموجات فوق البنفسجية .



شكل 27-3
سلسلة بالمر للخطوط الطيفية للهيدروجين .

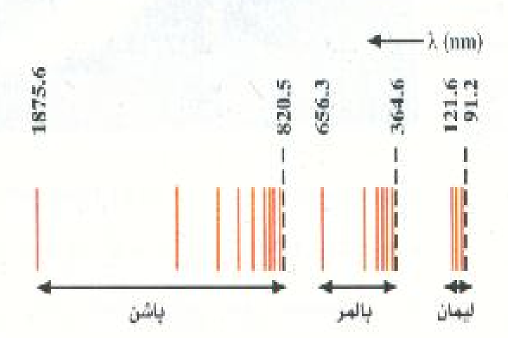
يلاحظ فى الطيف أن الخطوط تتقارب من بعضها البعض كلما قـل الطول الموجـى ، وأنه لا توجد خطوط ذات طول موجى أقصر من $\lambda = 364.6$ nm ، حيـث يسمى أقصر طول موجى فـى السلسلة **حد السلسلة** . ولابد أن هناك عددا لانهائيًا من الخطوط فـى هذه السلسلة وذلك حسب النظرية التى سنعرضها بعد قليل . لقد تمت التفرقة بين نحو 40 خطًا ؛ أما الباقى فهم من التكدس بحيث تصعب رؤية كل خط على حدة بوضوح .

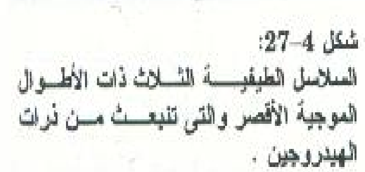
وحيث أن خطوط الطيف تبدو ذات نمط وترتيب محددين ، فإنه من الطبيعـى أن نحاول صياغة قانون تجريبى ينتظم هذه الأطوال الموجية . وقـد تم عمل هـذا لأول مـرة بواسطة بالمر عام 1885 تقريبًا وأصبحت تلك السلسلة تعرف باسم **سلسلة بالمر** . لقد وجد أن الأطوال الموجية للخطوط يمكن التعبير عنها بالمعادلة الملحوظة البساطة :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad \text{بالمر} \qquad n = 3, 4, 5, \ldots \qquad (27\text{–}1)$$

حيث $R = 1.097\times 10^{7}\ m^{-1}$ ويسمى ثابت ريدبرج تخليدًا لاسم الرجل الذى عين قيمته وتؤدى الأرقام الصحيحة بدءًا من 3 إلى مالانهاية إلى قيم الأطوال الموجية لخطوط سلسلة بالمر المبينة فى الشكل 3-27 . وعندما نضع n مساوية لمالانهاية فإن المعادلة تؤدى إلى حد السلسلة 364.6 nm .

وقد اكتشف فيما بعد أن ذرات الهيدروجين تنبعث منها سلاسل من الأطوال الموجية خلاف تلك التى تتضمنها سلسلة بالمر ، حيث تقع **سلسلة ليمان** فى منطقة الموجات فوق البنفسجية البعيدة ، وتقع **سلسلة باشن** فى المنطقة دون الحمراء (الشكل 4-27) وتخضع هذه السلاسل لمعادلات تشبه كثيرًا معادلة سلسلة بالمر :




شكل 4-27:
السلاسل الطيفية الثلاث ذات الأطوال الموجية الأقصر والتى تنبعث من ذرات الهيدروجين .

$$\text{ليمان}: \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 2, 3, \ldots\ldots$$

$$\text{بالمر}: \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 3, 4, \ldots\ldots$$

$$\text{باشن}: \quad \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 4, 5, \ldots\ldots$$

وهلم جرًا . . . ؛ حيث $R = 1.0974 \times 10^{7}\ m^{-1}$ ، **وهو نفس المقدار الثابت لكل سلسلة** .

من الواضح أنها أكثر من مجرد مصادفة ، أن تنطبق مثل هذه المعادلات البسيطة على ظاهرة معقدة كانبعاث الضوء ، ولابد أن هناك بساطة هائلة فى سلوك الذرات ، وهى المسئولة عن ظهور هذه المجموعة المتميزة من العلاقات .

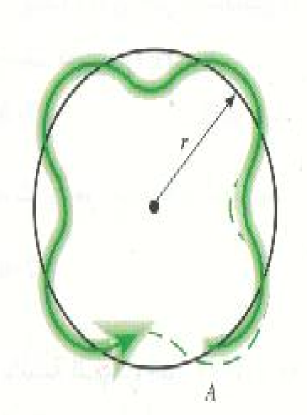
ثم ابتكر نيلز بوهر عام 1912 ـ حين كان طالبًا من الدانمارك يقضى عامًا فى منحة ما بعد الدكتوراه فى معامل رذرفورد بإنجلترا ـ أول تفسير مقبول لطيف الهيدروجين وقد بدأ بوهر بالنموذج الكلاسيكى فى الشكل 2-27 ، ولكى يلتف حول المشكلة المرتبطة بحقيقة أن هذا النموذج يتنبأ بإشعاع كالذى يحدث بالهوائى ، فقد تقبل ببساطة حقيقية أن بعض المدارات المستقرة المعينة ، يمكن للذرة أن تظل فيها بلا إشعاع . على أن سبب حدوث هذا الأمر لم يكن واضحًا بالنسبة لبوهر وإن كان قد جعله قادرًا على بيان كيفية صدور خطوط طيف الهيدروجين المشاهدة عمليًا .

وعلى الرغم من أهمية نظرية بوهر وقت ظهورها ، من حيث كونها ملهمة ودليلاً للباحثين الذين توالوا بعد ذلك ، إلا أنها أزيحت جانبًا بشدة. وتتلخص أكبر عيوبها فى

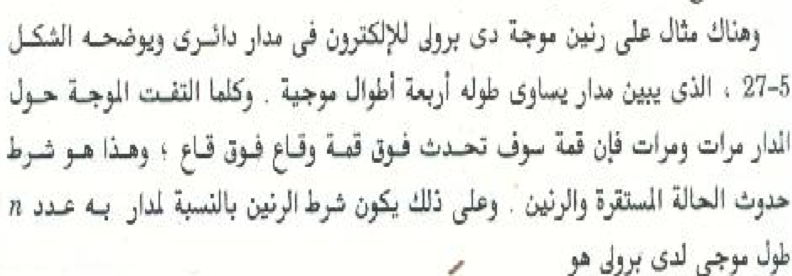
أن فرض بوهر الجسور حول وجود مدارات مستقرة لم يدعمه أى تفسير لسبب وجودها . لقد أمكن تقديم هذا التفسير عام 1923 عندما اكتشف دى بروى أن للإلكترون خواصًا موجية . ولهذا سنقفز إلى الأمام فى التاريخ ونقدم وصفًا لنموذج مبكر لذرة الهيدرجين تم الاستعانة فيه بالطبيعة الموجية للإلكترون . وسنطلق عليه النظرية **شبه الكلاسيكية** للذرة . وعلى الرغم من أن المعالجة الصحيحة للذرة باستخدام ميكانيكا الكم قد أزاحته جانبًا ، إلا إننا سنفحصه لأنه سوف يعدُّنا لفهم النموذج المقبول حاليًا .

2-27 ذرة الهيدروجين شبه الكلاسيكية

دعنا نفترض أن ذرة الهيدروجين مكونة من إلكترون كتلته m يدور فى مدار حول النواة كما فى الشكل 2-27 . (ولكى نتمكن فيما بعد من تطبيق هذه الحسابات على ذرات أخرى حيث $Z > 1$ فإننا سنعتبر الشحنة النووية مساوية Ze . وللهيدروجين $Z = 1$) . ونعلم جيدًا أن للإلكترون خواص موجية وأن طول دى بروى الموجى له هو $\lambda = h/mv$. على أن الإلكترون لن يتواجد فى حالة مستقرة مالم تكوِّن موجة دى بروى له موجة موقوفة داخل المدار . ولكى يحدث هذا الرنين ، لابد أن يكون طول المدار $2\pi r$ مساويًا لعدد صحيح من الأطوال الموجية .



شكل 5-27:
رنين موجات الإلكترون هو الذى يحدد المدارات المستقرة فى النموذج شبه الكلاسيكى ولو أن طول المدار $2\pi r$ كان مساويا لعدد صحيح من الأطوال الموجية فإن الموجة ستقوى نفسها عند عودتها إلى نقطة البداية A . وفى الحالة المبينة هنا $2\pi r = 4\lambda$.



وهناك مثال على رنين موجة دى بروى للإلكترون فى مدار دائرى ويوضحه الشكل 5-27 ، الذى يبين مدار يساوى طوله أربعة أطوال موجية . وكلما التفت الموجة حول المدار مرات ومرات فإن قمة سوف تحدث فوق قمة وقاع فوق قاع ، وهذا هو شرط حدوث الحالة المستقرة والرنين . وعلى ذلك يكون شرط الرنين بالنسبة لمدار به عدد n طول موجى لدى بروى هو

$$n\lambda_{\text{electron}} = 2\pi r_n \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (27\text{-}2)$$

ويبين التحليل المفصل باستخدام الميكانيكا الموجية أن مدار الإلكترون الذى يحقق هذا الشرط للرنين لابد أن يكون مستقرًا . والإلكترون فى مثل هذا المدار لا يقوم بشكل متواصل بإشعاع الطاقة بالطريقة التى تفعلها شحنة نقطية تدور فى مدار حسب النموذج الكلاسيكى . وحيث أن $\lambda_{\text{electron}} = h/mv$ فيمكننا أن نعيد كتابة المعادلة (2-27) على الصورة المناسبة ونحلها بحثًا عن كمية التحرك الزاوية $r_n m v_n$ لإلكترون فى المدار رقم n :

$$r_n m v_n = n\left(\frac{h}{2\pi}\right) \qquad (27\text{-}3)$$

يلاحظ أن هذه المعادلة لكمية التحرك الزاوية هى نفس الشرط الذى وضعه بوهر لاختيار المدارات المستقرة ، وإن كان لم يستطع تقدير تبرير فيزيائى له . ونرى الآن لماذا كان لابد من صحته : إنه شرط حدوث رنين لموجة الإلكترون داخل الذرة ولسوء الحظ فإن كلاً من v_n و r_n غير معلومة فى المعادلة (3-27) ، وعلينا إيجاد معادلة أخرى للوصول إلى هاتين الكميتين اللتين تميزان المدارات الإلكترونية وقد تولى بوهر إيضاح كيفية عمل هذا .

يمكننا إيجاد معادلة ثانية إذا تنبهنا إلى أن قوى كولوم ، الكلاسيكية ، بين الإلكترون والنواة ذات الشحنة الموجبة ، هي التي توفر قوى الجذب المركزي التي تمسك بالإلكترون في مداره . فإذا اعتبرنا أن النواة الثقيلة ستظل ساكنة ، لأمكننا كتابة ما يلي للإلكترون المتحرك في المدار

قوة كولوم = قوة الجذب المركزي

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = k_e \frac{(Z_e)(e)}{r_n^2} \qquad (27\text{-}4)$$

حيث k_e هو ثابت قوة كولوم ($k_e = 8.99 \times 10^9$ N.m^2/C^2)

يمكننا الآن حل المعادلتين (3-27) و (4-27) آنيًا لإيجاد سرعة الإلكترون v_n ونصف قطر مداره r_n :

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{و} \quad v_n = \frac{h}{2\pi n m r_1} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots \qquad (27\text{-}5)$$

حيث r_1 هو نصف قطر أصغر مدار ممكن ($n = 1$) ، ويعطى بالمعادلة

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 Ze^2 mk_e} \qquad (27\text{-}6)$$

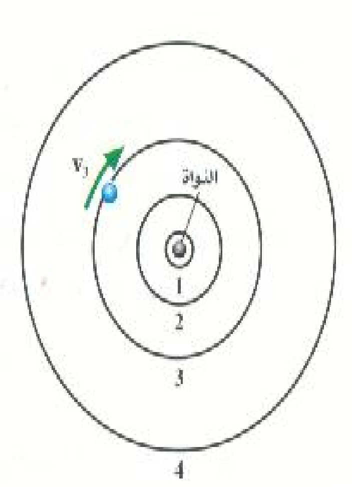
وبالنسبة للهيدروجين $Z = 1$ و $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ m وهو يسمى **نصف قطر بوهر** ، نظرًا لأن بوهر تنبأ به بالنسبة لذرة هيدروجين غير مستثارة . وقد تنبأ بوهر أيضا فيما بعد بالمدارات المستقرة والتي تعطى أنصاف أقطارها بالمعادلة (5-27) ويطلق عليها أيضًا **مدارات بوهر** . وقد أثبتت التجربة أن لذرات الهيدروجين غير المستثارة نصف القطر 0.053 nm بالفعل كما تنبأت به هذه النظرية . وسنعرف في القسمين التاليين كيف تفسر النظرية طيف الهيدروجين الانبعاثي المشاهد بالتجربة .

27-3 مستويات طاقة الهيدروجين

لقد رأينا أن ذرة الهيدروجين لابد أن تكون لها حالات مستقرة تكون فيها الذرة ثابتة ومتزنة . وقد توصلت النظرية التي ألممنا بها إلى أن تلك الحالات المستقرة تتكون من مدارات دائرية ذات أنصاف أقطار تعطى ، في حالة الهيدروجين ، بالعلاقة :

$$r_n = n^2 (0.53 \times 10^{-10}\ \text{m}) \quad , \quad n = 1, 2, \ldots\ldots$$

ويوضح الشكل 6-27 المدارات القليلة المستقرة الأولى ، وسنتعرف الآن على الطاقة التي للذرة في كل من هذه الحالات .



شكل 6-27:
يقوم الإلكترون بالدوران حول النواة في سلسلة من المدارات المستقرة التي تحقق شرط الرنين ، ولن تتاح له أية مدارات أخرى مستقرة وحجم النواة في الشكل مبالغ فيه إلى حد كبير .

لابد لكل من الحالات المستقرة التي وجدناها من طاقة مميزة لها . وطاقة الذرة تتكون من شقين ؛ أحدهما هو طاقة حركة الإلكترون عندما يتحرك في مداره ؛ وتعطى هذه الطاقة - بالنسبة للمدار رقم n بالعلاقة ،

$$(\text{KE})_n = \frac{1}{2} m v_n^2$$

حيث أمكن لنا إهمال ظواهر النسبية ؛ وعند استعمال المعادلة 4-27 تصبح هذه العلاقة

$$(\mathrm{KE})_n = \frac{Ze^2k_e}{2r_n} \qquad (27-7)$$

ويمتلك الإلكترون بالإضافة إلى طاقة حركته ، طاقة وضـع كهربيـة سـالبة . ويرجـع السبب فـي كونهـا سالبة إلى أننـا نعرف طاقـة وضع شحنتين على أنها تساوى الصفر عندما تكون المسافة بينهما لانهائية . وكلما اقترب الإلكترون من النواة ، فإنه « ينحـدر » بالنسبة لطاقة الوضع لأن النواة تجذبه ، أى أنه يتحـرك نحـو طاقـات وضـع أقـل مـن الصفر أى سالبة . وطاقة وضع إلكترون يقع على مسافة r_n من شحنة موجبة Ze هى

$$(\mathrm{PE})_n = \frac{-Ze^2k_e}{r_n} \qquad (27-8)$$

فإذا أضفناها إلى طاقة حركة الإلكترون فى المدار رقم n (المعادلة 7-27) فإننـا نحصـل على الطاقة الكلية للذرة فى الحالة المستقرة رقم n :

$$E_n = \frac{-Ze^2k_e}{2r_n} \qquad (27-9)$$

يلاحظ أن طاقة الذرة سالبة وتصبح أكثر سالبية كلما انخفضت قيمـة r_n (وبعبـارة أخـرى : كلما اقترب الإلكترون من النواة) .

يمكننا الآن كتابة المعادلة (9-27) على صورة أكثر ملاءمة باستخدام المعـادلتين (5-27) و (6-27) للتعويض عن قيمة r_n :

$$E_n = -\left(\frac{1}{n^2}\right)\left(\frac{2\pi^2Z^2e^4k_e^2m}{h^2}\right) \qquad (27-10)$$

وإذا عوضنا عن قيم الثوابت الواردة فى هذه المعادلة فإننا نحصل عندما $Z = 1$ على :

$$E_n = -\frac{2.18\times10^{-18}\ \mathrm{J}}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2}\,\mathrm{eV} \qquad (27-11)$$

ومعنى **الطاقة الكلية السالبة** هو أن الإلكترون **مرتبط** بالنواة ، ولو أنه اكتسب ما يكفـى من الطاقة من أحد المصادر الخارجية (بالتصادم مثلاً ، حتى تصبح طاقته الكلية موجبة ، فإنه لن يصبح مرتبطاً : بل سيصير حراً .

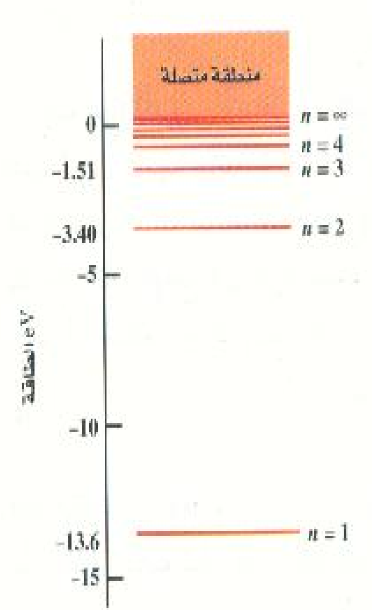
ولنتذكر أن كل قيمة من قيم n تناظر حالة مستقرة واحدة للذرة . فالحالة $n = 1$ ، فى إطار النموذج شبه الكلاسيكى ، تناظر إلكترونا يدور فى أصغـر مـدار ممكـن لـه r_1 . وتسمى طاقة الذرة فى هذه الحالة ، **الحالة الأرضية** وهى تساوى $E_1 = -13.6\ \mathrm{eV}$ ، ولما كانت النظم إذا خلى بينها وبين أية مؤثـرات خارجيـة تميـل إلى الـهبوط إلى أدنـى طاقة ممكنة ، فإن ذرات الـهيدروجين توجد عادة فى الحالة $n = 1$. وعندما $n = 2$ ، وهى تناظر حالة الطاقة الأعلى التالية ، فإن نصـف قطـر المـدار (مـن المعادلـة 5-27) يصبح $4r_1$ ، وعندئذ تصبح طاقة الذرة هى :

$$E_2 = -\frac{13.6}{2^2}\,\text{eV} = -3.4\ \text{eV}$$

يلاحظ هنا أن E_2 أكبر من E_1 ، بمعنى أن طاقة الذرة فى الحالة 2 أعلى من طاقتها فى الحالة 1 . وسنكتب على سبيل الإيجاز :

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{و} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2}\,\text{eV} \qquad (27\text{–}12)$$

وكما هو واضح فإن طاقات الإلكترون فى الذرة مكماة مثلما كانت حالة الجسيم المحصور داخل أنبوبة .



شكل 7–27:
الرسم البيانى لمستويات طاقة الهيدروجين . هناك عدد لا نهائى من المستويات فيما بين $n = 4$ و $n = \infty$.

من المناسب دائمًا أن نمثل طاقات النظم المكماة (كالذرات مثلاً) على هيئة ما يسمى **الرسم البيانى لمستويات الطاقة** ؛ وبالنسبة لذرة الهيدروجين فإنه موضح بالشكل 7–27 . وهو بمثابة مقياس رأسى للطاقة مع خطوط أفقية مرسومة بحيث تناظر طاقات الحالات المستقرة للذرة . وقد بينا عدة مستويات أولى فقط ، لأن تلك المستويات تصير عند قيم n الأعلى من ذلك متلاصقة لدرجة يصعب معها رسمها . ويتضح هذا من حقيقة أن كل المستويات بدءًا من $n = 3$ حتى $n = \infty$ لابد أن تقع داخل فجوة صغيرة بين -1.51 eV والصفر . وحيث أن نصف قطر المدار يتزايد بسرعة بزيادة n فإن الإلكترون يصير متحررًا من النواة تمامًا عند $n = \infty$ ، وتصير الذرة عندئذ مؤينة .

نلاحظ أن هناك منطقة مميزة بالتعبير **منطقة متصلة** ، وتقع لطاقات أكبر من الصفر . وعند قيمة $n = \infty$ يكون الإلكترون متحررًا من الذرة ويكون ساكنًا . وتكون قيم الطاقة الأعلى بمثابة طاقة الحركة الانتقالية للإلكترون الحر . ولكن هذه الطاقة ليست مكماة ولذلك فإن جميع قيم الطاقة فوق $E = 0$ تكون متاحة .

مثال 27-1

ما مقدار الطاقة اللازم لتأيين ذرة هيدروجين موجودة عند حالتها الأرضية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : مم تتكون عملية التأين ؟

الإجابة : تتكون من تحرير الإلكترون من الذرة.

سؤال : ماذا يعنى هذا بدلالة طاقة الإلكترون ؟

الإجابة : يعنى أن نعطى الإلكترون ما يكفى من الطاقة حتى تصبح $E_{tot} \geq 0$. وطاقة التأين هى الطاقة اللازمة لجعل $E_{tot} = 0$.

الحل والمناقشة : يبين الشكل 7–27 أن الحالة الأرضية ($n = 1$) ذات طاقة $E_{tot} = -13.6$ eV ، أى أن هذا المقدار $+13.6$ eV هو أدنى طاقة لازمة لتأيين الذرة .

27–4 انبعاث الضوء من الهيدروجين

تتواجد ذرات الهيدروجين عادة فى أدنى حالات الطاقة عندما $n = 1$ ؛ ويقال عنها

عندئذ إنها غير مستثارة . إلا أنك إذا قذفت الذرات بجسيمات كالإلكترونات أو البروتونات، فإن التصادمات كفيلة باستثارتها . وبعبارة أخرى قد يمد التصادم الذرة بما يكفى من الطاقة لنقلها من الحالة الأرضية إلى حالة مستقرة أعلى .

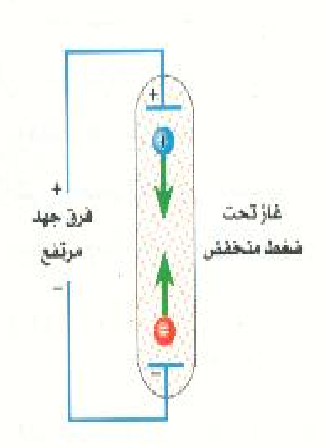
وفرق الطاقة بين الحالتين $n = 1$ و $n = 2$ ، كما هو واضح من الشكل 7-27 بالنسبة للهيدروجين هو :

$$E = E_2 - E_1 = 13.6 - 3.4 = 10.2 \text{ eV}$$

أى أن الجسم المقذوف لابد أن تكون لديه طاقة مقدارها 10.2 eV حتى يتمكن من استثارة الذرة من الحالة $n = 1$ إلى الحالة $n = 2$. وبنفس الطريقة نجد أنه لاستثارة الذرة من الحالة $n = 1$ إلى الحالة $n = 3$ تلزم طاقة مقدارها .

$$E = E_3 - E_1 = 13.6 - 1.51 = 12.1 \text{ eV}$$

ومن الطرق الشائعة لاستثارة ذرات غاز ما (راجع الشكل 8-27) أن نطبق عليه فرق جهد مرتفع وهو تحت ضغط منخفض . ويحتوى الغاز عادة على قليل من الإلكترونات الحرة والأيونات (نتيجة للنشاط الإشعاعى الطبيعى والأشعة الكونية - راجع الفصل الثامن والعشرين) ، ويتم تعجيل هذه الإلكترونات والأيونات فى فرق الجهد فتتصادم مع ذرات الغاز مولدة بهذا انهمارًا من الجسيمات المشحونة . ويصبح الغاز فى الأنبوبة - التى تسمى **أنبوبة تفريغ** - محتويًا على عدد كبير من الذرات المؤينة والمستثارة إلى درجة كبيرة . ومن النماذج على تلك الأنابيب مصابيح إعلانات غاز النيون ومصابيح الفلورسنت . ولعلك تعلم أن تلك الأنابيب تنتج ألوانا مميزة للأضواء . وسنوضح فيما يلى السبب فى أن أنبوبة تفريغ غاز الهيدروجين لابد أن ينبعث منها الضوء .



شكل 8-27:
يقوم فرق الجهد المرتفع عبر أنبوبة التفريغ بجعل الإلكترونات الحرة والأيونات تتحرك داخل الأنبوبة تحت تأثير عجلة تسارع . فإذا كان فرق الجهد كبيرًا بما يكفى فإن هذه الشحنات المتحركة ستقوم بتأيين ذرات أخرى عند التصادم معها .

تميل الذرات - شأنها فى هذا شأن جميع النظم الفيزيائية - إلى الهبوط إلى أدنى حالة من حالات الطاقة الممكنة . وتفقد الإلكترونات المستثارة فى ذرات الهيدروجين طاقاتها تلقائيًا وتهبط بذلك إلى حالات ذات طاقات أدنى . فقد يهبط إلكترون مستثار فى الحالة $n = 3$ ، مثلاً ، إلى الحالة $n = 2$ ، وبذلك يفقد بصورة أو بأخرى ، فرق الطاقة بين هاتين الحالتين ، وهو $3.4 - 1.5 = 1.9 \text{ eV}$. من الممكن أن تفقد الذرة هذا القدار من الطاقة من خلال تصادمات متبادلة مع الذرات الأخرى . ويتجلى معظم الطاقة التى تفقد بهذه الطريقة فى النهاية فى صورة طاقة حرارية . إلا أن هناك وسيلة أخرى ، يمكن بها للذرة أن تتخلص من الطاقة الزائدة ؛ إنها تستطيع أن تشع فوتونًا .

افترض أن ذرة هيدروجين تقوم بإشعاع فوتون عندما يسقط إلكترونها من المستوى $n = j$ إلى المستوى $n = i$. إن الفرق بين طاقتى هذين المستويين $E_j - E_i$ لابد أن يكون مساويًا لطاقة الفوتون الذى تم إشعاعه ولكن طاقة الفوتون هى hc/λ ، ولذا يكون لدينا :

$$\text{طاقة الفوتون} = hc/\lambda = E_j - E_i$$

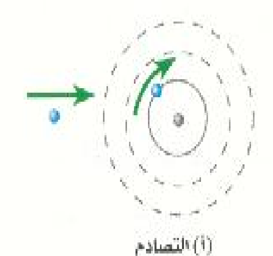
وإذا ما لجأنا إلى المعادلة (10-27) للتعويض بقيم كل من E_i و E_j فإن :

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{2\pi^2Z^2e^4k_e^2m}{h^3c}\left(\frac{1}{i^2}-\frac{1}{j^2}\right) \qquad (27-13)$$

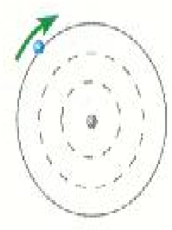
يلاحظ هنا أن المعادلة (13-27) تتخذ نفس الشكل الذى رأيناه فى المعادلات التجريبية لسلاسل ليمان وبالمر وغيرها . وعند مقارنة المعادلة (1-27) مع (13-27) فسنجد أن ثابت ريدبرج R الذى تم تعيينه بالتجربة لابد أن يتساوى مع المعامل الوارد بالمعادلة (13-27) عند وضع $Z = 1$ (أى للهيدروجين) :

$$R=\frac{2\pi^2e^4k_e^2m}{h^3c}$$

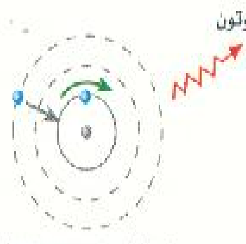
يضم هذا التعبير الرياضى على مالا يقل عن خمسة ثوابت فيزيائية أساسية ولعله يجدر بك أن تقوم بإجراء الحسابات المؤدية إلى إيجاد قيمة $R = 1.0974 \times 10^7\ m^{-1}$ وقد كانت هذه النتيجة من الإنجازات المدهشة لنظرية بوهر التى كانت فى تلك الأيام تستقر على أسس فيزيائية واهية .



(أ) التصادم



(ب) ذرة مستثارة



(جـ) العودة إلى الحالة الأرضية مع إطلاق طاقة

شكل 9-27:
ذرة هيدروجين فى الحالة الأرضية $n=1$ عندما تستثار إلى الحالة $n=3$. إنها تبعث فوتونًا عندما تهبط إلى الحالة الأرضية مرة أخرى (لاحظ أن المدارات ليست مرسومة بمقياس رسم حقيقى) .

وهكذا تقدم لنا المعادلة (13-27) تفسيرًا لطيف الهيدروجين فى إطار تغيرات طاقة الإلكترون عندما يقفز بين الحالات المستقرة المتاحة . ويمكننا أن نكتب الصورة العامة للأطوال الموجية المسموح بها كالآتى :

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{i^2}-\frac{1}{j^2}\right) \qquad (27-14)$$

افترض ـ مثلاً ـ أن التصادم قد دفع بالإلكترون إلى المدار $n = 3$ ، كما هو واضح فى الشكل 9-27 . إذا هبط الإلكترون مرتدًا إلى المدار $n = 1$ ، فإن أحد الفوتونات سينطلق حاملا معه الطاقة المفقودة ، وبالاستعانة بالمعادلة (14-27) نصل إلى :

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{3^2}\right)$$

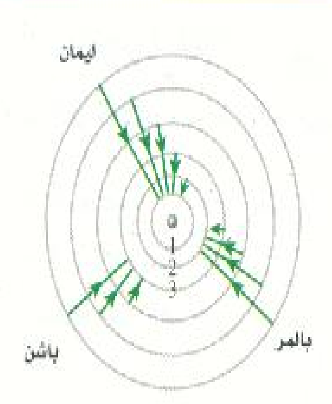
التى يتضح أنها تعطى الخط الثانى فى سلسلة ليمان . ويمكننا فى الواقع ، أن نحصل على سلسلة ليمان كلها إذا جعلنا $i = 1$ و $j = 2, 3, 4, \ldots\ldots$ فى المعادلة (14-27) ، **تنبعث سلسلة ليمان من خطوط الطيف عندما يهبط الإلكترون من المدارات الخارجية إلى المدار $n = 1$.**

وبالمثل ، إذا هبطت الإلكترونات من المدارات الخارجية إلى المدار $n = 2$ ، فإننا نحصل على سلسلة من الأطوال الموجية كالتالى :

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{j^2}\right) \qquad j = 3, 4, \ldots\ldots$$

وهى المعروفة بسلسلة بالمر . أى أن **سلسلة بالمر من الخطوط الطيفية تنبعث عندما تهبط الإلكترونات إلى المدار $n = 2$** . وكما قد تتوقع فإن سلسلة باشن تنشأ من الانتقالات إلى المدار $n = 3$. ويلخص الشكل 10-27 هذه الحقائق حيث ترى بعض الانتقالات الممكنة فقط .

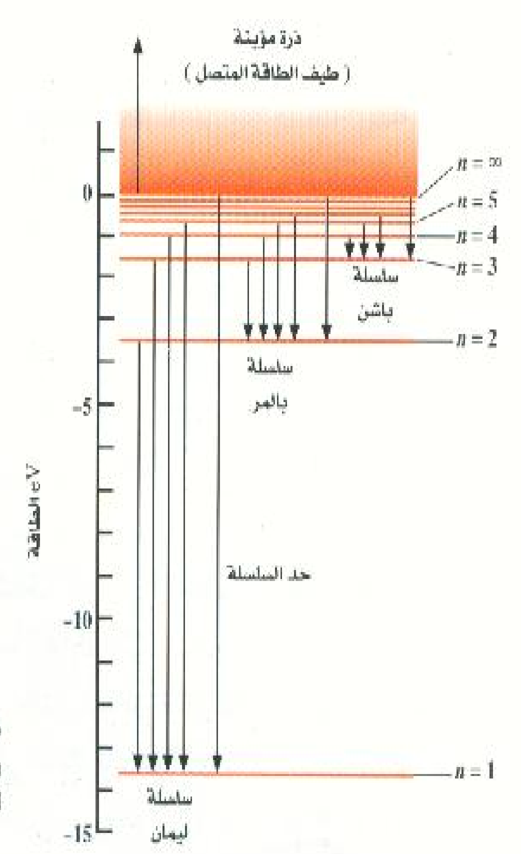
يقل الفرق فى الطاقة بين المستويات المختلفة بسرعة ، كلما تناولنا مستويات أعلى فأعلى . وعلى ذلك ، فإن الطاقة المنبعثة عندما يهبط الإلكترون من المدار 10 إلى المدار 2 ، لا تكاد تختلف عن الطاقة المنبعثة عندما يهبط من المدار 100 إلى المدار 2 . ومعنى هذا أن الخطوط فى سلسلة بالمر تصبح متقاربة جدًا من بعضها البعض كلما أخذنا فى تناول الأطوال الموجية المنبعثة نتيجة الانتقالات من المدارات الخارجية إلى المدار 2 . ومن الطبيعى أن أكبر قدر من الطاقة سينبعث إذا هبط الإلكترون من خارج الذرة ($n = \infty$) إلى المدار $n = 2$ ؛ وهذا يقودنا إلى انبعاث الطول الموجى لحد السلسلة .



شكل 10-27:
أصل السلاسل الطيفية المختلفة للهيدروجين (المدارات ليست مرسومة بمقياس رسم حقيقى) .

ولمزيد من الإيضاح حول أصل هذه السلاسل الطيفية ، نشير إلى الشكل 7-27 مرة أخرى ، والذى سنعيد رسمه فى الشكل 11-27 ، مع إضافة خطوط رأسية ذات أسهم تبين الانتقالات الإلكترونية الممكنة . وهناك طريقة تجعلنا ندرك من لمحة واحدة كيفية تغير الأطوال الموجية للخطوط المنبعثة . إن طاقة الانتقال تتناسب مع طول الخط الرأسى ذى السهم المناظر لذلك الانتقال . ومن ثم تكون أسهم سلسلة ليمان (وليست كل الخطوط مبينة هنا) أطول من تلك المناظرة لسلسلة بالمر ، مما يدل - على الفور - على أن الأطوال الموجية لسلسلة ليمان أقصر . ونستطيع أن ندرك بسهولة أيضًا من هذا الرسم البيانى أن خطوط الطيف فى سلسلة تناظر الانتقالات من قيم أعلى للعدد n ، سوف تكون متلاصقة جدًا مع بعضها البعض ، وذلك لأن لمستويات الطاقة هذه قيم تكاد تكون متساوية .

تمرين : احسب قيمة R إذا علمت قيم كل من m ، k_e ، h ، c و e . استخدم القيم إلى أربعة أرقام معنوية .



شكل 11-27:
رسم بيانى لمستويات الطاقة المناظرة لمختلف السلاسل الطيفية للهيدروجين .

مثال توضيحى 1-27

أوجد الطول الموجى للخط الرابع فى سلسلة باشن .

استدلال منطقى : نعلم أن سلسلة باشن تنشأ من الانتقالات إلى الحالة $n = 3$ (بالشكل 11-27) . ويحدث الخط الرابع عندما تهبط الذرة من الحالة $n = 7$. ومن ثم نحصل من المعادلة (14-27) على ،

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{7^2}\right)$$

وبالتعويض عن قيمة $R = 1.0974 \times 10^7\ m^{-1}$ ، نجد أن $\lambda = 1005\ nm$ ، وهو طول موجى يقع فى المنطقة دون الحمراء القريبة .

تمرين : ما هو الطول الموجى للخط الثانى فى سلسلة باشن ؟ **الإجابة** : 1281 nm .

مثال 2-27

الهليوم وحيد التأين هو ذرة هليوم فقد منها أحد إلكترونيها ، ولهذا قد نستطيع اعتبار الإلكترون المتبقى ، يسلك مسلك إلكترون ذرة الهيدروجين . (أ) ارسم رسماً بيانيًا لمستويات طاقة هذا الأيون ، مماثلاً للشكل 11-27 . (أ) أوجد الطول الموجى للخط الأول فى سلسلة بالمر الخاصة به .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الفرق بين هذا الأيون وذرة الهيدروجين ؟

الإجابة : للهليوم بروتونان داخل نواته ولذلك $Z = 2$ ، والمعادلة (12-27) تشير إلى أن طاقة الإلكترون تعتمد على Z^2 . وحيث أن $Z = 2$ فإن كل طاقة من طاقات الهيدروجين لابد أن تضرب فى 4 .

سؤال : ما هى معادلة مستويات الطاقة فى الهليوم المؤين ؟

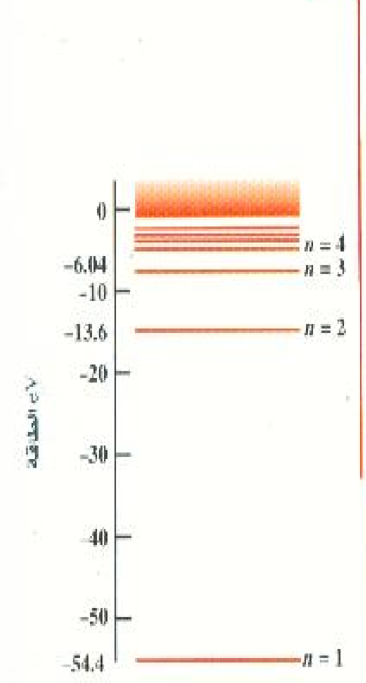
الإجابة : $E_n = 4\dfrac{-13.6\ eV}{n^2} = \dfrac{-54.4\ eV}{n^2}$

سؤال : ما الذى يحدد سلسلة بالمر للأطوال الموجية ؟

الإجابة : انتقالات الطاقة التى تنتهى عند الحالة $n = 2$.

الحل والمناقشة : تدل القيمة السابقة للطاقة E_n على أن طاقة تأين الإلكترون الوحيد المتبقى هى 54.4 eV . وعلاوة على ذلك ، فأول حالة مستثارة $(n = 2)$ ترتبط بنفس الطاقة التى لإلكترون الهيدروجين ، 13.5 eV . ويلخص الشكل 12-27 مستويات الطاقة .

إن أول خط (أطول طول موجى) فى سلسلة بالمر هو الذى يناظر الانتقال من $n = 3$ إلى $n = 2$. والطاقة المفقودة فى هذه الحالة هى $-6.04\ eV-(-13.6\ eV)$ أو 7.6 eV وذلك بالرجوع إلى الشكل 12-27 . وعلى هذا يكون الطول الموجى للفوتون المنبعث هو :



شكل 12-27:
الرسم البيانى لمستويات طاقة ذرات هليوم وحيدة التأين .

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

$$= \frac{(6.63\times10^{-34}\ \text{J.s})(3\times10^{8}\ \text{m/s})}{(7.6\ \text{eV})(1.6\times10^{-19}\ \text{J/eV})} = 163\ \text{nm}$$

وهو يقع فى الجزء البعيد من المنطقة فوق البنفسجية من الطيف .

والطريقة الثانية لإيجاد هـذا الطول الموجى هى باستخدام المعادلة 14-27 وذلك بوضع $R = 1.0974\times10^{7}\ \text{m}^{-1}$. لماذا كان وضع الرقم 4 ضروريًا ؟

تمرين : أوجد حد الطول الموجى لسلسلة باشن للهليوم وحيد التأين .

الإجابة : 205 nm .

5-27 طيف امتصاص الـهيدروجين

حزمة ساقطة

حزمة نافذة

ذرات هيدروجين

(أ) تجربة امتصاص

(ب) حزمة ساقطة

(طيف مستمر)



(جـ) حزمة نافذة

(طيف امتصاص)

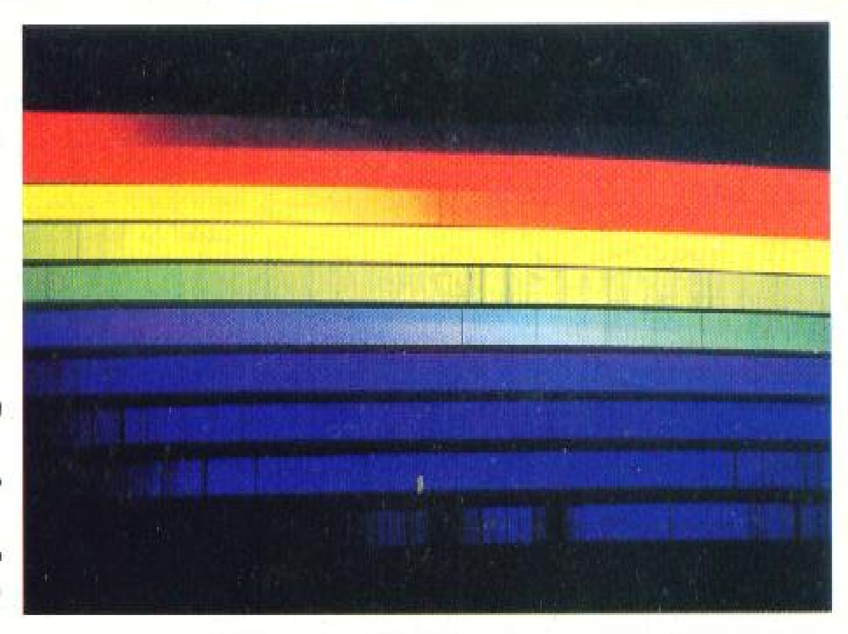
شكل 13-27:
تمتص ذرات الهيدروجين أطوالاً موجية محددة فقط من الطيف المستمر الساقط عليها . ما هى تلك الأطوال الموجية ؟

إن الذرات لا تبعث فقط بالضوء وإنما تمتصه أيضًا . ولكى نتعرف على امتصاص الضـوء ، سنقوم بفحص مـا يحـدث خلال التجربة المرسومة فى الشكل 13-27 (أ) . حيث تخترق حزمة من الضوء فوق البنفسجى ، أنبوبة مملوءة بذرات الـهيدروجين . تحتـوى الحزمة الساقطة على طيف مستمر (أى على مدى متصل من الأطوال الموجية) كمـا هـو موضح بالشكل 13-27 (ب) . إلا أن أطوالاً موجية محددة ستختفى كما هو مشـاهد من الحزمة النافذة ، ولذلك يبدو الطيف كما يصـوره الشكـل 13-27 (جـ) عندمـا يفحـص الضوء النافذ بواسطة إسـبكتروجراف (مطياف) . ونـود الآن أن نكتشـف أى الأطـوال الموجية تم امتصاصه من جانب ذرات الـهيدروجين .

ولعمل هذا ، علينا أن نفحص ما يحدث عندما تتصادم الفوتونـات التـى تحملـهـا الحزمة الساقطة مع ذرات الـهيدروجين . إن الذرات تكون فى الحالـة الأرضيـة لـهـا فى الظروف العادية . وعندما يرتطم فوتون بإحدى الذرات ، فإن الفوتون إما أن يفقـد كل طاقته أو لا يفقد شيئًا على الإطـلاق* . وبعبـارة أخـرى ، فـإن الفوتـون لا يمكـن امتصاصه جزئيًا . والعامل الأساسى الذى يحدد إمكانية حدوث أى من هـاتين العمليتـين هو ما يلى : عندما تكون طاقة الفوتون الذى يصطدم بالإلكـترون مساوية تمامًا لفرق الطاقة بين المستوى $n = 1$ ومستوى آخر ، فإن الفوتون سيُمتص ، وإلا فإنه لابد أن يظل محتفظًا بطاقته الأصلية .

والسبب فى هذا بسيط للغاية . فحيث أن الإلكترون فـى ذرة الـهيدروجين لا يمكنـه إلا احتلال أحد مستويات الطاقة المحددة لذا لا يمكنه أن يتلقى إلا مقادير الطاقة اللازمة لنقله من أحد المستويات إلى الآخر . وتنتمى هذه الانتقالات كما يوضح الشكـل 11-27 إلى الطاقات التى تناظر ظهور سلسلة خطوط ليمان (فى حالة الانبعاث) . وعلى ذلك سيكون

* سوف نتجاهل أثر كومتون (القسم 9-26) فى هذه المناقشة لأنه ذو قيمة مهملـة إلى جـانب الأثـر الذى نحن بصدده هنا .



يظهر فى طيف الضوء المنبعث من الشمس ، الكثير من الخطوط الداكنة ، مما يشير إلى الأطوال الموجية التى امتصتها ذرات الغلاف الجوى للشمس من الطيف المستمر المنبعث من الغلاف الضوئى للشمس .

للفوتونات التى طولها الموجى مساوٍ لنفس الطول الموجى للخط الأول من سلسلة ليمان (121.6 nm) ما يكفى من الطاقة لاستثارة الذرة من المستوى $n = 1$ إلى المستوى $n = 2$ وهكذا يتم امتصاصها بواسطة الذرة .

وبالمثل يتم امتصاص الفوتونات التى أطوالها الموجية مكافئة لأى من الخطوط الأخرى فى سلسلة ليمان ، بواسطة ذرات الهيدروجين ذات المستوى الأرضى ولن يتم امتصاص فوتونات ذات أطوال موجية متوسطة لأن طاقاتها لن تكون مناظرة لأحد الانتقالات الإلكترونية الممكنة . على أن الفوتونات ذات الأطوال الموجية الأقل من سلسلة ليمان ، وهو 91.2 nm ، يمكن أن تمتص . إذ إن لهذه الفوتونات ما يكفى من الطاقة لكى تستثير إلكترونًا إلى داخل منطقة مستويات الطاقة المتواصلة (المستمرة) حيث $E_{tot} \geq 0$. وتقوم الفوتونات التى لها هذا القدر الوافر من الطاقة بانتزاع الإلكترون تمامًا من الذرة (أى أنها تؤين الذرة) ثم تعطى الإلكترون المحرر طاقة حركة إضافية . ويتشابه هذا النوع من عمليات امتصاص الفوتون مع الانبعاث الكهروضوئى للإلكترونات من جسم صلب ، ويشار إليه على أنه **الأثر الكهروضوئى الذرى** .

يمكننا الآن ، بناءً على ما قيل ، أن نتنبأ بما سيحدث عندما يخترق طيف مستمر من الإشعاع غازًا من الهيدروجين الذرى . ستمر معظم الأطوال الموجية دون امتصاص لأن فوتوناتها لا تمتلك الطاقات المناسبة لاستثارة الذرة نحو حالة طاقة مسموح بها . إلا أن الأطوال الموجية المناظرة لخطوط فى سلسلة ليمان سيتم امتصاصها لأن الفوتونات المناظرة تمتلك الطاقة المناسبة لاستثارة الذرة نحو حالة طاقة مسموح بها . وسوف نطلق على مثل طيف الامتصاص هذا **طيف الامتصاص الخطى** . وكل الأطوال الموجية الأقصر من حد سلسلة ليمان سوف يتم امتصاصها ، لأن هذه الفوتونات سوف تؤين الذرة وتحمل الإلكترون إلى داخل منطقة الطاقة المتصلة . ويطلق على الامتصاص فى هذه المنطقة من الأطوال الموجية ، وهى بالمناسبة ليست مبينة فى الشكل 13-27 ، **طيف الامتصاص المستمر** ، لأن الامتصاص يشمل مدى مستمرًا من الأطوال الموجية .

علينا في النهاية ملاحظة أن خطوط الامتصاص التي تناظر خطوط سلسل بالمر لا توجد إلا إذا كانت ضعيفة للغاية . والسبب في هذا هو ما يلي . إن سلسلة بالمر تنتج كما نعلم من الانتقالات بين الحالة $n = 2$ والحالات الأعلى . وحيث أن عددًا قليلاً من الإلكترونات هو الذي يحتل الحالة $n = 2$ ، فإن عددًا قليلاً جدًا من الذرات هو الذي يكون قادرًا على تحقيق الحالة التي يقتلع فيها إلكترون من الحالة $n = 2$ إلى حالات أعلى . ولهذا فإن الفوتونات التي تناظر هذه الطاقات لن يتم امتصاصها بقوة . ومن الطبيعة أنه عندما يكون غاز الهيدروجين مستثارًا بدرجة كبيرة ، فإن الموقف يكون أكثر ملاءمة لاكتشاف الامتصاص عند الأطوال الموجية لسلسلة بالمر . لماذا ؟

مثال 27-3

عندما تستثار ذرة هيدروجين عن طريق امتصاص فوتون فوق بنفسجي ، فإن الذرة تستطيع أن تشع بعد ذلك ضوءًا به أطوال موجية متنوعة تعتمد على الطريقة التي يعود بها الإلكترون إلى الحالة الأرضية . اعتبر مثلاً ، أن ذرات الهيدروجين قد امتصت فوتونًا طوله الموجي $\lambda = 97.23$ nm . ما هي الأطوال الموجية (بخلاف الطول الموجي 97.23 nm) التي يمكن لهذه الذرات أن تبعثه فيما بعد ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هو المبدأ الذي يحدد الطول الموجي المنبعث من الذرة ؟

الإجابة : إنه مبدأ بقاء الطاقة . إن ما يحدد طاقات الفوتونات المنبعثة هي الطاقات التي قد يفقدها الإلكترون عندما يقفز من حالة مستثارة إلى حالات أشد ترابطًا بالنواة .

سؤال : كيف يمكنني إيجاد n الخاصة بالحالة المستثارة من عملية امتصاص الفوتون ؟

الإجابة : بالنسبة لسلسلة ليمان : $\left(\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{n^2}\right)\right)$ ونستطيع من هذه العلاقة إيجاد n التي تناظر $\lambda_n = 97.23$ nm .

سؤال : ما الذي يحدد الانتقالات الإلكترونية التي ينتج عنها فوتونات ؟

الإجابة : لابد أن تكون الانتقالات إلى قيم n الأقل وتستمر إلى أن يصل الإلكترون إلى $n = 1$. ولن يدخل في الحساب طبعًا الانتقال المباشر إلى $n = 1$ والذي يعيد انبعاث الفوتون 97.23 nm .

الحل والمناقشة : يمكننا إيجاد الحالة المستثارة التي تناظر الفوتون 97.23 nm إذا أعدنا ترتيب معادلة سلسلة ليمان على النحو التالي :

$$\frac{1}{n^2} = 1 - \frac{1}{R\lambda_n}$$

$$= 1 - \frac{1}{(1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})(0.9723 \times 10^{-7} \text{ m})} = 0.0625$$

$$n^2 = 16.0 \quad , \quad n = 4$$

ويمكن للفوتونات أن تنبعث من هذه الحالة عندما يقوم الإلكترون بالانتقالات التالية :

1 من $n = 4$ إلى $n = 3$

2 من $n = 4$ إلى $n = 2$

3 من $n = 3$ إلى $n = 2$

4 من $n = 3$ إلى $n = 1$

5 من $n = 2$ إلى $n = 1$

الانتقال رقم (1) هو أول خط من مجموعة (سلسلة) باشن تحت الحمراء ؛ أما (2) و (3) فتمثل خطين من سلسلة بالمر المرئية ، وتنتمي (4) و (5) إلى سلسلة ليمان فوق البنفسجية .

وعلى هذا تكون مستويات الطاقة هي $E_1 = -13.6$ eV، $E_2 = E_1/4 = -3.4$ eV ، $E_3 = E_1/9 = -1.51$ eV و $E_4 = E_1/16 = -0.85$ eV . وفيما يلي نعرض تغيرات الطاقة المصاحبة للانتقالات وما يناظرها من الأطوال الموجية للفوتونات :

1 $\Delta E = 0.66$ eV $\qquad \lambda = \dfrac{hc}{\Delta E} = 1879$ nm

2 $\Delta E = 2.55$ eV $\qquad \lambda = 486$ nm

3 $\Delta E = 1.89$ eV $\qquad \lambda = 656$ nm

4 $\Delta E = 12.1$ eV $\qquad \lambda = 103$ nm

5 $\Delta E = 10.2$ eV $\qquad \lambda = 122$ nm

27-6 النظرية الموجية للذرة

تتنبأ نظرية بوهر - كما شاهدنا - بمستويات الطاقة الصحيحة لذرة الهيدروجين . كما أنها تفسر الطيف الذى تبعثه ذرات الهيدروجين أو تمتصه . وقد أمكن - باستخدام الخواص الموجية للإلكترون - أن نجد تبريرًا لفرض بوهر الذى يقتضى وجود الإلكترون فى حالات مستقرة معينة فحسب . وكان بوهر قد افترض أن تلك الحالات المستقرة تتكون من مدارات دائرية تحيط بالنواة . وقد يكون من الأحسن أن نبدأ بمعادلة شرودنجر (القسم 12-26) التى تصف سلوك موجات دى برولى وأن نعين الحلول الرنينية لإلكترون ما موجود فى نطاق جهد كولوم للنواة .

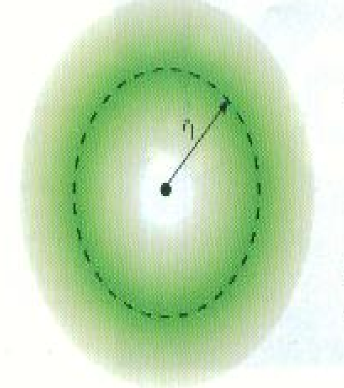
ولعلنا نذكر من القسم 13-26 أن رنين موجات جسيم داخل أنبوبة كفيل بأن يدلنا على المكان الذى يحتمل (أو لا يحتمل) وجود الجسيم فيه . وكان كل رنين يتميز بعدد كمى يتمثل برقم من 1 إلى ∞ . ويتضح من هذا أن حالات الرنين تتطلب - فى حالة الأبعاد الثلاثية - وجود ثلاثة أرقام كمية لكى يمكن تمييز شكلها ؛ ولذلك كان علينا أن نتوقع تميز أشكال رنين ذرة الهيدروجين بثلاثة أرقام كمية وليس برقم منفرد كالذى استخدمناه عند تناول نظرية بوهر . وحتى مع هذا فإن أشكال الرنين لابد أن تدلنا على الموقع الذى يحتمل تواجد الإلكترون فيه ، عندما تكون الذرة فى حالة رنين معينة .

دعنا الآن نناقش النتائج التى يتم الحصول عليها بالنسبة لذرة الهيدروجين عندما تستخدم معادلة شرودنجر لإيجاد الحالات الرنينية لتلك الذرة .

تقدم النظرية الموجية لذرة الهيدروجين نفس مستويات الطاقة التى أوجدناها فيما سبق :

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\ \text{eV}$$

وتؤكد هذه النتيجة أن ما أسفرت عنه النظرية الموجية سوف يتنبأ بطيف الهيدروجين المشاهد عمليًا ؛ حيث تتميز كل حالة من حالات الطاقة برقم أو عدد كمى n سنسميه **العدد الكمى الأساسى** .



شكل 14-27: يتواجد الإلكترون الخاص بذرة الهيدروجين التى فى حالتها الأرضية ، بأكبر قدر من الاحتمال ، داخل قشرة كروية مشوشة تتمركز حول النواة . ويصور الشكل مقطعًا مستعرضًا للقشرة يمر بالنواة . ويكون احتمال وجود الإلكترون أكبر ما يمكن حيث تكون الظلال أكثف ما يمكن .

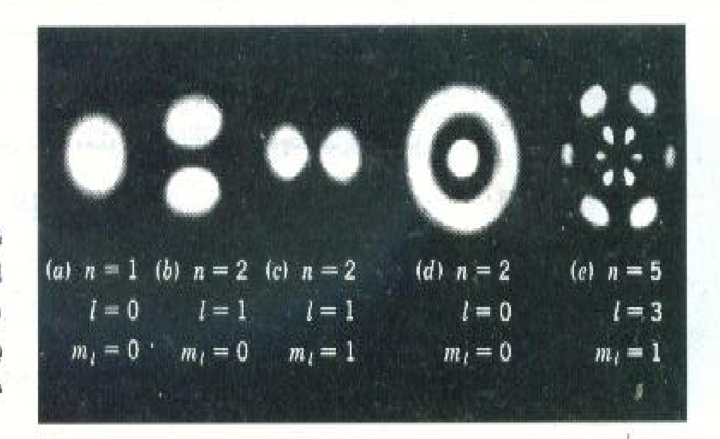
يختلف الشكل الرنينى المناظر للعدد $n = 1$ بشكل جوهرى عن المدار الدائرى الذى افترضه بوهر للحالة $n = 1$ ، ويتضح أن للإلكترون احتمال محدد لأن يتواجد فى بقعة ما داخل قشرة دائرية مشوشة تتمركز حول النواة . ويوضح لنا الشكل 14-27 مقطعًا مستعرضًا لهذه القشرة ، أما الإلكترون فأكبر احتمال لوجوده حيث الظلال أكثف ما يمكن . وعلى الرغم من أن أكبر احتمال لوجود الإلكترون هو على مسافة نصف القطر r_1 من النواة إلا أن لدى الإلكترون بعض الاحتمال فى أن يتواجد فى أى بقعة من المنطقة المظللة . وعليك أن تكون واثقًا من فهمك لمدى اختلاف هذه النتيجة عن مفهوم بوهر الذى يقتضى مدارًا دائريًا واحدًا . أما النظرية الموجية فتستبدل بهذا المدار الدائرى قشرة كروية ولا تحصر - بالإضافة إلى ذلك - الإلكترون عند نصف قطر محدد ، كما أن القشرة مشوشة للغاية . ويصور الشكل 15-27 هذا الأمر بصورة بيانية .



شكل 15-27: تتنبأ النظرية الموجية بالاحتمالات النسبية الموضحة وهى أن الإلكترون سوف يتواجد عند أنصاف أقطار مختلفة بالنسبة لمركز ذرة الهيدروجين ، عندما تكون فى الحالة الأرضية لها .

والشكل الرنينى الذى تتنبأ به النظرية الموجية للحالة $n = 2$ أعقد بكثير من الحالة $n = 1$ ، حيث يتضح أن هناك ثلاث حالات رنين لها طاقة الحالة $n = 2$ ونستطيع تصور هذه الحالات الرنينية وتلك المناظرة لأعداد كمية n أكبر من ذلك ، بواسطة رسوم بيانية توضح فرصة وجود الإلكترون فى مواقع مختلفة فى الذرة . ولا تصور هذه الرسوم ، ويطلق عليها **المسارات أو المدارات** ، الإلكترون على أنه يتحرك فى مسار كما فى نموذج بوهر شبه الكلاسيكى . يوضح الشكل 16-27 بعض هذه المدارات فى الحالات $n = 1, 2, 5$ وذلك فى بعدين . ومن الممكن الحصول على صورة ثلاثية الأبعاد إذا تمت إدارة هذه الأشكال حول محور رأسى يمر بمركزها ، وسوف تشير شدة استضاءة الشكل عند نقطة ما إلى الاحتمال النسبى لوجود الإلكترون عند تلك النقطة . إذا ما تناولنا قيما أكبر للعدد n ، فإن المدارات تصبح معقدة تمامًا كما يصور ذلك الشكل 16-27 هـ .

وهكذا نرى مما تقدم أن نظرية بوهر ما هى إلا تبسيط مبالغ فيه لسلوك الإلكترون فى ذرة الهيدروجين ، فعلى سبيل المثال ، لا يوجد سند لمفهوم بوهر عن المدارات الثابتة . ومع ذلك فمستويات الطاقة للذرة قد تم التنبؤ بها بشكل صحيح فى إطار نظرية بوهر ؛ بل إن العدد الكمى الرئيسى n الذى اقترحه بوهر ذو أهمية عظيمة . وعلى الرغم من أننا لابد أن نتمسك دائمًا بتحفظاتنا على نموذج بوهر فى أذهاننا ، إلا أن ذلك النموذج يوفر لنا إطارًا للوصف المنهاجى للذرات ، ولذلك لا نكف عن الإشارة والرجوع إليه .



شكل 16-27:
للحصول على توزيع إلكتروني في الأبعاد الثلاثة ، لابد من إدارة الأشكال المبينة بالرسم حول محور رأسي يمر بمركز كل منها .

27-7 الأعداد الكمية ومبدأ باولي للاستبعاد

تتواجد ذرة الهيدروجين وإلكترونها ـ كما رأينا ـ في مستويات طاقة محددة ومعلومة ، يميزها عدد صحيح هو n ، وتتحدد بالعلاقة :

$$E_n = \frac{-13.6Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

حيث $Z = 1$ في حالة الهيدروجين . وتتراوح قيمة العدد الصحيح n من 1 إلى مالانهاية كلما اتخذت الذرة قيمًا مسموحًا بها مختلفة للطاقة . وعلى الرغم من توصلنا إلى هذه النتيجة باستخدام نموذج بوهر ، إلا أن الصورة الموجية التي تقوم على حل معادلة شرودنجر ، تؤدي إلى نفس النتيجة . ونرى من ثم أن العدد n ، يمثل بارامترًا أساسيًا وضروريًا لوصف حالة ذرة الهيدروجين . وكما ذكرنا من قبل فإنه يسمى **العدد الكمي الرئيسي** . وهو يميز مستوى الطاقة الذى على الإلكترون أن يتواجد فيه . وقد تصور بوهر أن كل قيمة للعدد n يصاحبها مدار خاص للإلكترون وإن كان قد ثبت عدم وجود سند لهذا ، كما أشرنا في القسم السابق . ومع ذلك ، فمن الشائع أن يقال أن كل قيمة للعدد n تناظر **قشرة طاقة** معينة (بدلاً من تناظر مدارًا معينًا) تحيط بالنواة . وعندما تكون الذرة في مستوى الطاقة $n = 3$ ، مثلاً ، فإنه يقال ـ في العادة ـ أن الإلكترون موجود في القشرة $n = 3$.

لقد رأينا في القسم السابق أيضًا أن من الممكن وجود أكثر من شكل من الرنين الموجي بالنسبة لنفس قيمة العدد الكمي الرئيسي . وتنص النظرية الموجية على أن هناك عددين كميين آخرين لابد من تقديمهما حتى يتم تحديد رنين موجي معين داخل الذرة . ويرتبط أحد هذين العددين ، وهو **العدد الكمي المداري** ، بكمية التحرك الزاوية لإلكترون بوهر في مداره الرنيني . ويمثل هذا العدد بالحرف l ويمكن أن يتخذ قيمًا صحيحة تبدأ من 0 حتى $(n - 1)$. فعندما يكون $n = 1$ ، مثلاً ، فإن القيم الممكنة بالنسبة للعدد l ستكون محددة بقيمة منفردة وهي $l = 0$. وعندما يكون $n = 2$ ، فإن من الواضح أن l سيتخذ القيمتين 0 و 1 ، حيث أن $n - 1 = 1$ في هذه الحالة . يلاحظ بالطبع أن l أقل دائمًا من n .

أما العدد الكمي الثالث فيسمى **العدد الكمي المغناطيسي** ، m_l ، ويمكن أن يتخذ القيم $\pm l$, ... , $0, \pm 1, \pm 2$. ويصف هذا العدد الاتجاهات الممكنة لكمية التحرك الزاوية للإلكترون عندما يتواجد في مجال مغناطيسي خارجي . وعندما يكون $n = 4$ ، مثلاً ، فإن أكبر قيمة ممكنة للعدد l هي 3 ، ويتخذ العدد m_l القيم $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$. وبعبارة أخرى ، فعندما يكون الإلكترون في مستوى الطاقة المناظر للعدد $n = 4$ ، فإن هناك سبعة مدارات ممكنة للعدد $l = 3$. وبالإضافة إلى ذلك ستكون هناك خمسة مدارات ممكنة للعدد $l = 2$ ، وثلاثة مدارات للعدد $l = 1$ ، ومدار واحد للعدد $l = 0$. أى أن الذرة يمكن أن تتواجد في (16) تشكيل إلكتروني رنيني مختلف ، عندما توجد في مستوى الطاقة $n = 4$.

جدول 1-27:

الأعداد الكمية الأربعة للإلكترون

الرئيسى	$n = 1, 2, 3, \ldots .$
المدارى	$l = 0, 1, 2, \ldots . n-1$
المغناطيسى	$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots , \pm l$
اللف	$m_s = \pm 1/2$

وفي الختام ، هناك شرط كمي للإلكترون نفسه ، فهو يمتلك عزمًا مغناطيسيًا صغيرًا بفضل كونه جسيمًا مشحونًا يدور حول نفسه في حركة مغزلية . ولا يتخذ عزمه المغناطيسي سوى اتجاهين فقط بالنسبة لمجال مغناطيسي خارجي : فهو إما موازٍ له أو موازٍ ومضاد . ويمكننا تمييز هذين الوضعين بأن تعين للإلكترون **عدد لف كمي** ، m_s ، ذى قيمتين ممكنتين هما $\pm 1/2$ ؛ وتمثل الإشارتان الاتجاهين المتاحين وهما الاتجاه الموازى والاتجاه الموازى والمضاد . ويلخص الجدول 1-27 الأعداد الكمية الأربعة اللازمة لوصف حالة إلكترون في ذرة ما . وسوف نطلق على كل مجموعة مكونة من الأربعة أعداد الكمية ، **حالة** إلكترونية للذرة . وسنرى على الفور أن هناك مبدأ بالغ الأهمية ، ينطبق على سلوك الإلكترونات في الحالات المتاحة .

لقد أولى العالم فولفجانج باولى عام 1925 اهتمامه الشديد لأول مرة بتحديد هذه الحالات الإلكترونية ، ورغب في تعميم هذه المفاهيم لتشمل ذرات أخرى غير الهيدروجين . وتوصل إلى الاستنتاج التالى الذى عرف **بمبدأ باولى للاستبعاد** . لكى يتمكن من تعيين حالات محددة للإلكترونات المختلفة في الذرات عديدة الإلكترونات بشكل صحيح .

لا يمكن لإلكترونين في ذرة ما أن يتخذا نفس مجموعة الأعداد الكمية الأربعة أى أنه لا يمكن لإلكترونين أن يتواجدا في نفس الحالة .

إن هذا المبدأ أساسى لفهم التركيب الإلكترونى للذرات ، كما سندرك في القسم التالى .

27-8 الجدول الدورى

لم نتناول حتى الآن - باهتمام - سوى ذرة بها إلكترون واحد فحسب ؛ وهى قد تكون ذرة هيدروجين ، أو ذرة هليوم وحيدة التأين ، أو ذرة ليثيوم ثنائية التأين ، وهكذا . ولكننا الآن في وضع يسمح لنا بدراسة كيفية ترتيب الإلكترونات الإضافية داخل ذرات متعددة الإلكترونات كالتى توجد في الطبيعة ويضمها الجدول الدورى للعناصر . ولكى نفعل هذا ، سنلجأ مرة أخرى - إلى مفهوم القشرات (أو الأغلفة) الإلكترونية التى

تحيط بالنواة ؛ حيث لكل قيمة من العدد n قشرة مصاحبة له . وسنعتبر ـ بالإضافة إلى ذلك ـ أن نفس حالات الرنين التى أوجدناها للذرة ذات الإلكترون الأوحد ، يمكن إجراؤها وصفيًا لذرات أكثر تعقيدًا . ومعنى هذا ، إننا سنستخدم الحالات الإلكترونية التى تتحدد بالأعداد الكمية الأربعة ، والتى تم وصفها فى القسم السابق .

إن السؤال الذى يطرح نفسه الآن هو : « كيف تقوم الإلكترونات بترتيب أنفسها فى الحالات المختلفة ، عندما يكون بالذرة أكثر من إلكترون ؟ » إن ذرة الكربون ـ مثلاً ـ لديها ستة إلكترونات ، ففى أى مستويات الطاقة والحالات الإلكترونية على هذه الإلكترونات أن تتواجد ؟ نستطيع الإجابة على هذا السؤال باستخدام القواعد الثلاث التالية والتى سبق وأن تعرفنا عليها :

1 إن عدد الإلكترونات فى أية ذرة متعادلة ، يساوى العدد الذرى Z لتلك الذرة .

2 جميع الإلكترونات فى ذرة غير مستثارة ، موجودة فى أدنى حالات ممكنة للطاقة . ويقال عندئذ أن الذرة فى حالتها الأرضية .

3 لا يمكن لأى إلكترونين فى ذرة ما أن يتخذا نفس الأعداد الكمية الأربعة (حسب مبدأ باولى للاستبعاد) .

هيا بنا الآن نستخدم هذه القواعد لكى نعين التركيب الإلكترونى للذرات غير المستثارة فى الجدول الدورى .

الهيدروجين (Z = 1)

سيتواجد الإلكترون المنفرد لهذه الذرة فى المستوى $n = 1$ ؛ وهو أدنى مستوى ممكن للطاقة ، وبهذا لا يكون مبدأ باولى للاستبعاد قد خرق .

الهليوم (Z = 2)

يستطيع إلكترونا هذه الذرة أن يتواجدا فى المستوى $n = 1$ ، وذلك لكونهما يستطيعان اتخاذ أعدادًا كمية غير متطابقة كما هو موضح فى الجدول 2-27 ، الذى تندرج به مجموعات الأعداد الكمية الممكنة فقط بالنسبة للمستوى $n = 1$. ولا يمكن لأى إلكترون ثالث أن يتواجد فى هذا المستوى . ويطلق على كل قيمة للعدد n **قشرة طاقة** ، ويقال أن القشرة $n = 1$ تكون ممتلئة إذا احتلها إلكترونان فحسب .

جدول 2-27:

الإلكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	1/2
2	1	0	0	-1/2

الليثيوم (Z = 3)

لهذه الذرة ثلاثة إلكترونات ولذلك لابد للإلكترون الثالث من أن يتجه إلى أعلى قشرة طاقة تالية ، أو التى عندها $n = 2$ (انظر الجدول 3-27) . وحيث أن هذا الإلكترون موجود فى مستوى الطاقة الثانى ؛ فإن ارتباطه بالذرة يكون أضعف من تلك التى فى الحالة $n = 1$. وعلى ذلك يستطيع الليثيوم أن يشارك بإلكترون واحد فى التفاعلات الكيميائية بسهولة ويسر . ولذلك يطلق على الليثيوم ؛ عنصرًا أحادى التكافؤ حسب المصطلحات الكيميائية (أو الذى تكافؤه واحد) .

جدول 3-27:

الإلكترون	n	l	m_l	m_s
1	1	0	0	1/2
2	1	0	0	-1/2
3	2	0	0	1/2

الذرات التى لـها قيم Z أكبر من 3

هناك عدد قليل من المجموعات الممكنة من الأعداد الكمية عندما تكون $n = 2$ وستجد أنها ثماني مجموعات إذا قمت بعدها (انظر الجدول 4-27)* . ومعنى ذلك أن القشـرة $n = 2$ يمكن أن يتواجد فيها ثمانية إلكترونات . أى أن القشرة لـن تمتلئ تمامًا إلى أن نصل إلى العنصر $Z = 10$ وهو النيون ، الذى يعد خاملاً من الناحية الكيميائيـة لأن قشراتـه ممتلئة . والعنصر الذى يأتى بعده هو الصوديوم $Z = 11$ ، وذرتـه أحاديـة التكـافؤ لأن إلكترونها الحادى عشر سيكون وحيدًا بالقشرة $n = 3$ ومن السهل إبعاده عن الذرة .

جدول 4-27:

n	l	m_l	m_s
2	0	0	± 1/2
2	1	0	± 1/2
2	1	+1	± 1/2
2	1	-1	± 1/2

وكلما تقدمنا نحو العناصر ذات القيم الكبيرة للعدد الذرى Z فى الجـدول كلمـا قلـت جدوى مفهوم القشرات ، ويعود ذلك إلى أن التباعد بين مستويات الطاقـة صغـير نسبيًا عند قيم n الكبيرة . وفى هذه الحالات قد يؤدى التنافر بين الإلكترونـات المختلفـة فـى الذرة ـ أحيانًا ـ إلى وجود طاقات من الكبر بحيث تلغى تأثير فروق الطاقة الموجودة بـين القشرات وعلى الرغم من ظهور هذه المشكلة ، يظل مفهوم القشرة ـ كما ثبت ذلك مفيـدًا للاعتبارات الوصفية .

مثال توضيحى 2-27

طبق مبدأ باولى للاستبعاد لكى تعين التوزيع الإلكـترونى فـى الحالـة الأرضيـة للأرجـون $(Z = 18)$ والروبيديوم $(Z = 37)$.

استدلال منطقى : تستوعب القشرتان $n = 1$ و $n = 2$ إلكـترونين وثمانيـة إلكترونـات على الترتيب ، وبذلك تكون عشر إلكترونات متواجدة فى هاتين القشرتين فـى كـل من الأرجون والروبيديوم . بالنسبة للقشرة $n = 3$ سيكون هناك ثمانى عشـرة (18) مجموعـة مستقلة من الأعداد الكمية ، كما هو موضح فى الجدول 5-27 ، ولذلك ستملأ الإلكترونات الثمانية المتبقية للأرجون القشرتين الفرعيتين $l = 0$ و $l = 1$ بالمستوى $n = 3$ وعندمـا تقـوم الإلكترونات فى الحالة الأرضية بملأ قشرة أو قشرة فرعية فـإن تلك الإلكترونـات مرتبطـة بقوة مع أنويتها ، مما يجعل الذرة خاملـة مـن الناحيـة الكيميائيـة . والأرجـون هـو أحـد الغازات النبيلة الخاملة كيميائيًا .

أما بالنسبة للروبيديوم فإن أول ثمانية عشر (18) إلكترونًا سـتحتل الحـالات التـى لـها نفس الأعداد الكمية مثل إلكترونات الأرجون الثمانية عشر . ثم تملأ الإلكترونات العشرة التالية القشرة الفرعية $l = 2$, $n = 3$. وهكذا يتبقى تسع إلكترونات لابد لـها أن تذهب إلى المستوى $n = 4$ ، بحيث يحتل اثنان منها القشرة الفرعية $n = 4$, $l = 0$ ، كما تحتل

* بالنسبة للذرات عديدة الإلكترونات ، فإن الإلكترونات التى لها نفس قيمة n (أى نفس القشـرة) ستوصف بأنها تقع فى نفس **القشرة الفرعية** إذا كان لها نفس قيمة l . وهكذا فإن الإلكترونات الستة فى الصفوف الثانى والثالث والرابع بالجدول 4-27 ستحتل نفس القشـرة الفرعيـة ، أمـا الإلكترونـان الموجودان فى الصف الأول من الجدول فيحتلان قشرة فرعية مختلفة .

الجدول 5-27 :

m_s	m_l	l	n	عدد حالات القشرة الفرعية
± 1/2	0	0	3	2
± 1/2	−1	1	3	6
± 1/2	0			
± 1/2	+1			
± 1/2	−2	2	3	10
± 1/2	−1			
± 1/2	0			
± 1/2	+1			
± 1/2	+2			

تحتل ستة إلكترونات أخرى القشرة الفرعية $n = 4$, $l = 1$. ويتبقى إلكترون واحد ، عليه أن يحتل واحدة من حالات $n = 4$, $l = 2$. وحيث أن هذا الإلكترون الأكثر بعدًا عن النواة (ويسمى إلكترون التكافؤ) ذو ارتباط ضعيف نسبيًا ، فإن الروبيديوم قادر على تكوين روابط كيميائية بسهولة مع العناصر الأخرى .

27-9 أشعة إكس (السينية) وأطياف الذرات عديدة الإلكترونات

يدلنا مبدأ باولى للاستبعاد ـ كما رأينا ـ على كيفية تعبئة الإلكترونات داخل ذرة ما في حالتها الأرضية . وتقدم لنا المعادلة 10-27 طاقة أى إلكترون ـ كتقريب أول ـ فى الحالة رقم n . وعلى ذلك تكون طاقة إلكترون فى ذرة عديدة الإلكترونات هى نفس طاقة إلكترون موجود فى نفس الحالة فى ذرة الهيدروجين مضروبة فى Z^2 . وينهار هذا التقريب بالنسبة للإلكترونات الخارجية للذرة ـ مع ذلك ـ لأن طاقات التفاعل بين هذه الإلكترونات تقترب من فروق الطاقة بين مستويات طاقة بوهر . وهكذا لا تستطيع طاقات بوهر أن تنطبق على هذه الإلكترونات الخارجية .

على أن ، طاقة التفاعل بين الإلكترونات تكون صغيرة بالنسبة لفروق الطاقة بين الحالتين $n = 1$ و $n = 2$. ففى حالة الزنك ، مثلاً ، $(Z = 30)$ ، تكون طاقات بوهر هى :

$$E_n = -\frac{13.6Z^2}{n^2}\ \text{eV} = -\frac{12{,}240}{n^2}\ \text{eV}$$

ويصبح الموقف أكثر إبهارًا بالنسبة للذهب $(Z = 79)$ حيث ،

$$E_n = -\frac{84{,}900}{n^2}\ \text{eV}$$

فكما نرى ، تصبح فروق الطاقة بين الحالتين E_1 و E_2 فى هذه الذرات مقدرة بعشرات

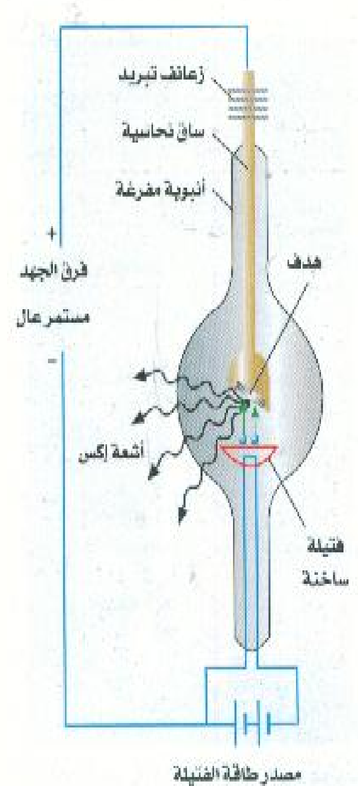
الآلاف من الإلكترون فولت ، وإذا قورنت طاقات التفاعل الكولومية بين الإلكترونات بطاقات ما بين القشرات هذه ، فإنها ستبدو صغيرة . ومن ثم تكون طاقات بوهر صحيحة تقريبًا بالنسبة للإلكترونات الموجودة في القشرتين $n = 1$ و $n = 2$ للذرات ذات الأعداد الذرية الكبيرة .

فإذا انتقلنا إلى إلكترون موجود في قشرة خارجية فإن الموقف سيبدو مختلفًا تمامًا . أولاً ، ستظهر إلكترونات القشرات الداخلية وهي تلغي جزءًا من الشحنة النووية وذلك لكونها أقرب إلى النواة ، ولذلك فإن الكترونات القشرة $n = 2$ « ترى » الشحنة النووية وكأنها $(Z - 2)e$ تقريبًا بدلاً Ze ؛ وبالمثل فإن إلكترونات القشرة $n = 3$ ؛ ترى الشحنة النووية وكأنها $(Z - 10)e$ وذلك بسبب الإلكترونين الموجودين في القشرة $n = 1$ والإلكترونات الثمانية الموجودة في القشرة $n = 2$. ويقال عندئذ أن الإلكترونات الداخلية « تحجب » الشحنة النووية عن الإلكترونات الخارجية .

وعلاوة على هذا التأثير فإن إلكترونات القشرة الخارجية معرضة لطاقات من ناحية التفاعل التنافرى للإلكترونات مع بعضها البعض والذى يكتنف كل الإلكترونات الأخرى بالذرة . ولقد ذكرنا من قبل أن هذه الطاقات تقترب في مقاديرها مع الفروق الصغيرة في الطاقة بين القشرات الخارجية ؛ وأن معادلة بوهر للطاقة لا تنطبق عليهم .

إن الذرة لكى تشع ، فلابد لبعض إلكتروناتها من أن تستثار إلى طاقات أعلى ؛ وحيث أن إلكترونات المدارات الخارجية لا تحتاج سوى لقدر ضئيل من الطاقة حتى تستثار إلى حالات فارغة ، لذا لن يكون من الصعب الحصول على ضوء مرئى من ذرات ذات Z مرتفعة . وما يحدث ببساطة هو أن تبخر المادة وتستخدم داخل أنبوبة تفريغ تشبه إلى حد بعيد تلك التى رأيناها في الشكل 27-8 . إلا أن خطوط الطيف التى تنبعث نتيجة انتقالات بين مستويات القشرة الخارجية تلك عديدة ومعقدة جدًا .

يصبح الموقف مختلفًا تمامًا بالنسبة للانتقالات التى تتضمن إلكترونات القشرة الداخلية . ويمكننا الملاحظة من المثال التوضيحى 27-2 أن القشرات $n = 1$ ، $n = 2$ ، $n = 3$ تكون ممتلئة في حالة ذرة الزنك غير المستثارة ، ومن ثم لا يمكن استثارة إلكترون داخلى $(n = 1)$ إلى أى من القشرتين $n = 2$ أو $n = 3$ الممتلئتين بسبب مبدأ الاستبعاد . ولكى نستثير إلكترونًا من $n = 1$ ، فإن الطاقة التى لابد من إمداد الذرة بها ، يجب أن تكون ـ على الأقل ـ كافية للسماح للإلكترون بالقفز إلى القشرة $n = 4$. وهذه الطاقة تصل إلى نحو 12,000 eV في حالة الزنك . وبمجرد حدوث تلك القفزة ، فإن ثغرة تنشأ في القشرة $n = 1$ ، وعندئذ يستطيع إلكترون من إحدى القشرتين $n = 2$ أو $n = 3$ ، أن يقفز بسهولة نحو تلك الثغرة ، مطلقًا فوتونًا ذا طاقة مساوية لفرق الطاقة بين الحالتين النهائية والابتدائية للإلكترون . إذا ما هبط إلكترون من $n = 2$ إلى $n = 1$ فإن طاقة الفوتون الذى سيطلقه ستصل إلى نحو 9000 eV . ولعلك تذكر من المثال التوضيحى 26-4 أن الفوتون الذى طاقته 1 eV يكون طوله الموجى 1240 nm ، لذا فالطاقة 9000 eV ستناظر طولاً موجيًا مقداره :

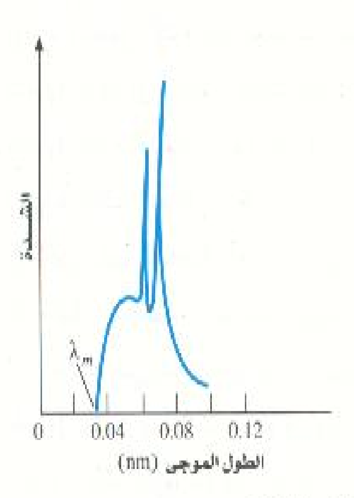


شكل 27-17:
تقذف الإلكترونات المنبعثة من الفتيل الساخن سطح الهدف الذى يقوم بإطلاق أشعة إكس .

$$\lambda = \frac{1\ \text{eV}}{9000\ \text{eV}} \times 1240\ \text{nm} = 0.14\ \text{nm}$$

ويقع هذا الطول الموجى فى منطقة أشعة إكس . هكذا نكتشف أن الانتقالات بين القشرات الداخلية فى ذرة ذات Z مرتفعة ، تؤدى إلى ظهور أشعة إكس ولكى نولد أشعة إكس يلزمنا أن نستثير إلكترونات القشرة الداخلية نحو قشرات خارجية خالية ، ويستلزم هذا ـ كما رأينا ـ كميات ضخمة من الطاقة .

يوضح الشكل 17-27 دائرة أنبوبة أشعة إكس نموذجية ، حيث تنبعث الإلكترونات من فتيلة ساخنة ثم تعجل عبر فرق للجهد من الرتبة 10^5 V . وعندما ترتطم هذه الإلكترونات ذات الطاقة المرتفعة بالذرات ذات العدد الذرى Z الكبير فى الهدف فإنها تقتلع إلكترونات من القشرات الداخلية للذرات . وعندما تهبط إلكترونات أخرى نحو الثغرات المتكونة ، فإن فوتونات أشعة إكس تنبعث . ويكون لأشعة إكس المنبعثة بهذه الطريقة أطوال موجية تميز فرق الطاقة بين القشرات المختلفة فى الذرة ، بمعنى أن الفوتونات المنبعثة تحمل من الطاقة ما يساوى الفرق بين طاقتى قشرتين تمثلان نقطتى النهاية والبداية بالنسبة للإلكترون الذى يهبط إلى الثغرة . ويشار إلى أشعة إكس المنبعثة فى هذه العملية **بأشعة إكس المميزة** .



شكل 18-27:
طيف أشعة إكس المنبعثة من هدف من الموليبدنم المقذوف بإلكترونات طاقتها 35,000 eV .



وهناك نوع آخر من أشعة إكس المنبعثة من الهدف المقذوف بالإلكترونات ويشار إليه بمصطلح **أشعة الفرملة** . وكما يقتضى معنى المصطلح ، فإن هذه الأشعة تنبعث بواسطة الإلكترونات المقذوفة عندما يحدث لها إبطاء عند اصطدامها بالهدف وكلنا يعلم أن أى شحنة معجّلة تقوم بإشعاع موجات كهرومغناطيسية ، ولذلك يصدر إشعاع من هذه الإلكترونات المقذوفة عندما تتعرض لإبطاء قوى بواسطة الهدف . وحيث أن معدل الإبطاء كبير جدًا ، لذا يكون الإشعاع المنبعث ذا طول موجى قصير ، ويكون إشعاع الفرملة فى منطقة أشعة إكس . إلا أن لأشعة الفرملة ـ خلافًا لأشعة إكس المميزة ـ مدى متصل من الأطوال الموجية وهذا يعكس حقيقة أن الإبطاء يتم بعدد لا نهائى تقريبًا من الطرق المختلفة ولذلك تتباين الطاقة المنطلقة من تصدم لآخر .

يحتوى الشكل 18-27 على رسم بيانى للإشعاع المنبعث من هدف صنع من عنصر الموليبدنم ، قذف بإلكترونات طاقتها 35,000 eV . القمتان الحادثتان بالشكل هما أشعة إكس المميزة المنبعثة نتيجة هبوط الإلكترونات إلى القشرة $n = 1$ من القشرتين $n = 2$ و $n = 3$. وبطبيعة الحال ، ينتمى الطول الموجى الأقصر للانتقال ذى الطاقة الأكبر وهو الانتقال من $n = 3$ إلى $n = 1$. وأشعة الفرملة هى المسئولة عن الإشعاع منخفض الشد ، الذى ينتشر على مدى جميع الأطوال الموجية الأكبر من λ_m . وحيث أن طاقة الإلكترونات المقذوفة كانت 35,000 eV ، فإن الفوتونات المنبعثة لا يمكن أن تتخذ طاقات أكبر من هذه القيمة ، فإذا استخدمنا التحويل الذى يقتضى أن الطول الموجى 1240 nm يكافئ 1 eV (المثال التوضيحى 4-26) لوجدنا أن 35,000 eV تناظر 1240/35,000 = 0.035 nm .

وكما هو واضح من الشكل 18-27 فإن أكبر طاقة لأشعة الفرملة هى بالفعل ، ما يناظر هذا الطول الموجى .

مثال توضيحي 3-27

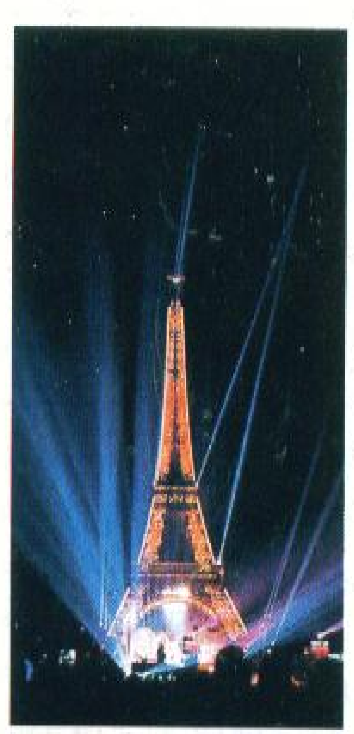
أوجد فرق الطاقة بين المستويين $n = 1$ و $n = 2$ فى الموليبدنم ، مستعينًا بالبيانات الواردة فى الشكل 18-27 .

استدلال منطقى : لقد علمنا عند مناقشة الشكل 18-27 أن القمة الحادثة عند 0.070 nm قد نتجت من الانتقال $n = 2$ إلى $n = 1$ ؛ ولذلك فالفوتون الذى طوله الموجى 0.070 nm يحمل الطاقة التى يفقدها الإلكترون عندما يهبط من القشرة $n = 2$ إلى القشرة $n = 1$. وحيث أن 1240 nm تناظر 1 eV ، فإن 0.070 nm تناظر طاقة مقدارها 1240/0.070 أو نحو 18,000 eV . وعلى ذلك فلابد أن يكون فرق الطاقة بين هاتين القشرتين لذرات الموليبدنم نحو 18,000 .

تمرين : قذف هدف من الزنك بإلكترونات طاقتها 13,000 eV . ما هو أقصر طول موجى لأشعة إكس المنبعثة من الهدف ؟ وما هو الطول الموجى - بالتقريب - المناظر للانتقال من $n = 3$ إلى $n = 1$ ؟ **الإجابة** : 0.095 nm ؛ 0.114 nm .

10-27 ضوء الليزر

تتكون حزمة الضوء العادى من مجموعة من الموجات المنفردة الصادرة عن ذرات منفردة بالمصدر الضوئى . وعلى الرغم من كون الموجات المكونة لحزمة ضوء وحيد اللون ذات طول موجى واحد ، إلا أن الموجات التى تبثها الذرات المنفردة ليست متفقة فى الطور ؛ فهى لا تحتفظ بعلاقات طور بين بعضها البعض . وبعبارة أخرى لا تكون هذه الموجات مترابطة . ويشير التحليل الإحصائى إلى أنه إذا كانت سعة كل موجة هى A ، فإن سعة الموجة الناتجة من جمع عدد N من مثل هذه الموجات هى $A\sqrt{N}$.



تستطيع حزم أشعة الليزر الضيقة والقوية أن توفر مؤثرات بصرية رائعة .

افترض - مع هذا - أننا استطعنا جعل الذرات تتزامن عند إطلاق موجات الضوء وحيد اللون فى مصدر ضوئى ما ، بحيث كان لتلك الموجات نفس الطور وأصبحت الموجات مترابطة . عندئذ تكون سعة الموجة المحصلة للعدد N من الموجات المترابطة والمتفقة فى الطور ولكل منها سعة A هى مجموع سعات الموجات أو AN . وإذا قارنا هذه السعة مع سعة الموجات غير المترابطة $A\sqrt{N}$. لوجدنا أن النسبة بين السعتين هى $AN/A\sqrt{N}$. وحيث أن شدة الموجة تتناسب مع مربع سعتها ، فإننا نجد أن :

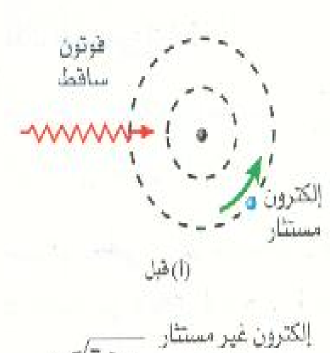
$$\frac{\text{شدة الموجات المترابطة}}{\text{شدة الموجات غير المترابطة}} = \left(\frac{AN}{A\sqrt{N}}\right)^2 = N$$

أى أن الحزمة المكونة من N موجة ستكون أشد N مرة عندما تكون الموجات مترابطة عما لو كانت الموجات غير مترابطة . ولأن حزمة نموذجية قد تتكون من مليون موجة منفردة عند نقطة ما ، فإن الحزمة المترابطة قد تكون أشد بنحو مليون مرة من حزمة مماثلة ولكنه غير مترابطة .

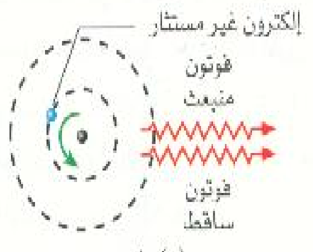
ولم يتم ابتكار مصدر ضوئي للموجات المترابطة إلا في الخمسينيات من القرن العشرين . وكان هذا المصدر هو ما سمي الليزر (وهو مكون من الحروف التي تبدأ بها كلمات ـ تكبير الضوء بواسطة الانبعاث المستحث للإشعاع ـ باللغة الإنجليزية) .

Light Amplification by stimulated Emission of Radiation

وتستخدم في هذا المصدر الحقيقة التي أشار إليها أينشتين عام 1917 : من الممكن للذرات الموجودة في حالة مستثارة أن تستحث لكي تقفز إلى مستوى طاقة أدنى عندما يرتطم بها فوتون في ضوء ساقط عليها إذا كانت طاقته تماثل الفرق بين مستويي الطاقة الواردين في عملية القفز . أي أن الإلكترون يطلق فوتونًا له طول موجي يماثل الطول الموجي للفوتون الساقط . وينطلق كل من الفوتونين ، الساقط والمنبعث بعيدًا عن الذرة وهما متفقين في الطور .



(أ) قبل



(ب) بعد

شكل 19-27:
ينتج الانبعاث المستحث موجات مترابطة

وهذه العملية التي يطلق عليها **الانبعاث المستحث** ، موضحة في الشكل 19-27 . وسنرى الآن كيف أمكن الاستفادة من هذه الظاهرة في الليزر .

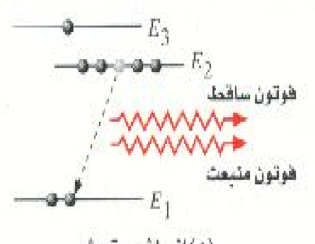
إن الإلكترونات لابد أن تكون في حالة مستثارة حتى يمكنها إطلاق طاقة عندما تستحث بواسطة فوتونات ساقطة . ولذلك لزم أن تكون هناك وسيلة للاستثارة كما أنه للحصول على شدة كبيرة للانبعاث المستحث ، لابد من وجود عدد من الإلكترونات في الحالة المستثارة أكبر من العدد الموجود في الحالة الأرضية . وهذا الموقف هو ما يطلق عليه **انقلاب توزيع الإلكترونات** . ولكي يتحقق هذا الانقلاب فإن الإلكترون الموجود في حالة مستثارة عليه أن يظل بها لبعض الوقت قبل أن يعود تلقائيًا إلى الحالة الأرضية والحالة المستثارة هذه يقال أنها حالة **استقرار مؤقت** أو حالة **شبه مستقرة** : وهي الحالة التي يكون فيها الإلكترون مستقرًا بشكل غير عادي ، ومنها يهبط الإلكترون إلى حالة أدنى بعد فترة طويلة نسبيًا .

E_3
E_2
E_1
(أ) نظام غير مستثار

E_3
E_2
E_1
(ب) نظام مستثار

نستطيع الآن ، في ضوء الاعتبارات السابقة ، أن نلخص العمل الأساسي لليزر بالرسم البياني لمستويات الطاقة كالمبين في الشكل 20-27 . وتستثار الإلكترونات بوسيلة ما من الحالة الأرضية E_1 إلى حالة مستثارة E_3 (الشكل 20-27 (أ) ، (ب)) ثم تقفز معظم الإلكترونات إلى الحالة شبه المستقرة E_2 حيث تظل هناك لفترة ما ولا تعود تلقائيًا إلى E_1 مباشرة مما ينشأ عنه تراكم الإلكترونات في E_2 أي انقلاب في توزيع الإلكترونات بالنسبة للحالة الأرضية . فإذا مر فوتون طاقته $E_2 - E_1$ خلال الذرة ، فإنه يكون قادرًا على **حث** إلكترون لكي يقفز من E_2 إلى E_1 (الشكل 20-27 (جـ)) . وينشأ عن هذه القفزة فوتون مطابق للفوتون الساقط ومتفق معه في الطور (الشكل 20-27 (د)) وبتكرار هذه العملية ذاتيًا العديد من المرات فإن عدد الفوتونات يتنامى بمتوالية هندسية ويحدث تكبير لشدة الضوء .

E_3
E_2
حالة استقرار مؤقت (شبه مستقرة)
فوتون طاقته $E_1 - E_2$
E_1
(جـ) نظام شبه مستقر



(د) انبعاث مستحث

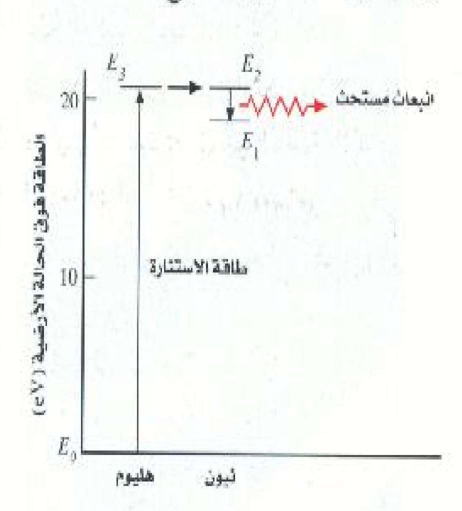
شكل 20-27:
لابد من توافر انقلاب في التوزيع وحالات استقرار مؤقت ، وانبعاث مستحث في أي جهاز ليزر .

من أجهزة الليزر الشائعة ليزر هليوم ـ نيون ، الذي يتكون من أنبوبة تفريغ كهربي مستقيمة جدًا ، وتحتوي على 15% من حجمها من غاز الهليوم و 85% من غاز النيون . ويضم النظام الذري لذرات الهليوم والنيون ثلاثة مستويات للطاقة ذات أهمية خاصة : هي

E_1 ، E_2 و E_3 يوضحها الشكل 21-27 و E_3 هى حالة الاستقرار المؤقت للهليوم وتقع عند 20.61 eV فوق E_0 ، أما E_2 فهى حالة الاستقرار المؤقت للنيون وتقع عند 20.61 eV فوق E_0 . والحالة E_1 تمثل مستوى طاقة في **النيون** عند 1.96 eV أسفل E_2 .

تكون معظم إلكترونات النظام تقريبًا فى الحالة الأرضية قبل تنشيط التفريغ الكهربى ثم يستثار بعضها ليقفز إلى المستويين E_2 و E_3 بواسطة تفريغ ذى جهد مرتفع وتقوم التصادمات بين ذرات الهليوم والنيون بنقل طاقة إلكترونات الهليوم المستثارة إلى E_2 مما يخلق انقلابًا فى توزيع الإلكترونات بين E_2 و E_1 .

سنفترض الآن أن عددًا قليلاً من ذرات النيون المستثارة قد قام بالانتقال تلقائيًا من E_2 إلى E_1 ، مطلقًا بهذا فوتونات طولها الموجى 632.8 nm ، وتناظر قفزة فى الطاقة مقدارها 1.96 eV . ويمكن لهذه الفوتونات أن تمتص بواسطة الإلكترونات القليلة فى المستوى E_1 فتستثار إلى E_2 . كما أنها تستطيع - كما فى الشكل 21-27 . أن تجعل الإلكترونات تهبط من E_2 إلى E_1 مفضية بهذا إلى حدوث انبعاث مستحث لموجات مطابقة للموجات الساقطة . ونظرًا لوجود انقلاب التوزيع فإن الانبعاث المستحث يكتسح أى امتصاص تال للفوتونات وتأخذ شدة الموجات المنبعثة فى الازدياد كلما مرت خلال الغاز . وتكون النتيجة النهائية هى حزمة مترابطة تمر خلال أنبوبة التفريغ .



شكل 21-27:
الرسم البيانى لمستويات الطاقة فى ليزر الهليوم ــ نيون . تستثار الإلكترونات إلى المستويين E_2 و E_3 بواسطة تفريغ كهربى . ثم تقوم التصادمات بين ذرات الهليوم والنيون بجعل إلكترونات الهليوم تستثير المزيد من إلكترونات Ne إلى المستوى E_2 خالقة بهذا انقلابًا فى التوزيع فى هذه الحالة شبه المستقرة . ثم تستحث إلكترونات المستوى E_2 لكى تقفز إلى المستوى E_1 الذى يقع عند 1.96 eV أسفل E_2 .

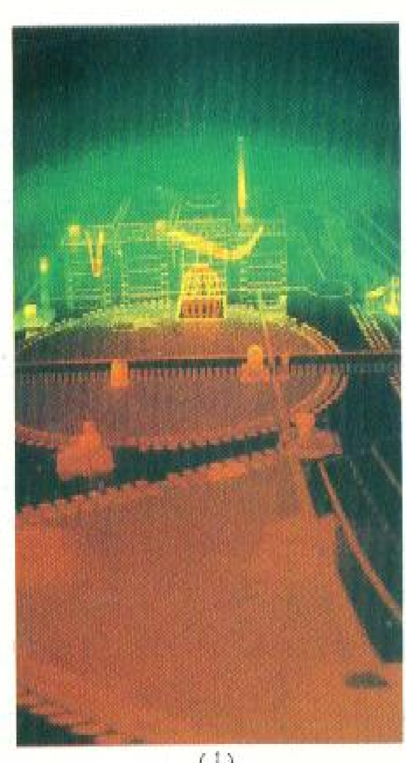
مرآة
أنبوبة زجاجية
ذرة مستثارة
مرآة ذات تسريب

شكل 22-27:
رسم تخطيطى يبين كيفية تراكم الانبعاث المستحث ، لكى يكوّن موجة مترابطة قوية فى أنبوبة الليزر .

ويتكون طرفا أنبوبة التفريغ من مرآتين مستويتين ومتوازيتين إلى أقصى حد (الشكل 22-27) . إلا أن المرآة اليمنى تفضض بشكل طفيف فقط لدرجة أنها لا تعكس إلا نحو 99% من الضوء فقط . إن العديد من ذرات النيون المستثارة تقوم بإطلاق فوتونات متماثلة ومتفقة فى الطور كما يدل على ذلك الشكل 22-27 . وما هى إلا فترة صغيرة حتى

تمتلئ الأنبوبة بالموجات المترابطة التي تتحرك يمنة ويسرة بين المرآتين الموجودتين عند طرفي الأنبوبة ، وبذلك تنشأ حزمة قوية جدًا ووحيدة اللون ومترابطة في نفس الوقت داخل الأنبوبة . ويخرج كسر صغير من الحزمة المترابطة من الأنبوبة عبر المرآة « ذات التسريب » عند أحد طرفي الأنبوبة .

وحزمة الضوء الصادرة من جهاز الليزر قوية للغاية ، وذلك لأن جميع الموجات التي تخرج من طرف أنبوبة الليزر تكون مترابطة . ويكون الطول الموجي للحزمة محددًا بشكل قاطع وهو 632.8 nm لأن جميع الموجات متطابقة . وليست الحزمة قوية ومترابطة فحسب ولكنها دقيقة جدًا ومستقيمة لا تتفرق إلا بقدر ضئيل . ويرجع ذلك إلى أن أية أشعة داخل الأنبوبة ؛ تتعرض لتفرق شديد بعيدًا عن المحور ، ستفقد في الجوانب خلال رحلاتها العديدة جيئة وذهابًا . وهناك أهمية عملية عظيمة ، نابعة من حقيقة أن الحزمة ليست متفرقة بشكل ملموس ؛ وخلافًا لما يحدث في حالة بصيلة مصباح عادى ، فإن طاقة حزمة الليزر لا تأخذ شكل المروحة وهي تنتشر في الفضاء ؛ وإنما تنطلق في الفضاء عبر أسطوانة دقيقة وتحتفظ بشدتها لمسافات طويلة جدًا .



(أ)



(ب)

(أ) هولوجرام لقصر الاكتشافات في لافيليت بباريس ، (ب) (إلى اليمين) يمكن استخدام الضوء المترابط لليزر لمعرفة الأشكال كما يحدث في أجهزة مسح شفرة القضبان (باركورد) الشائعة الاستعمال في كثير من نقط التحقق في المحلات التجارية .

على الرغم من أنك قد تكون معتادًا على استخدام ليزر الهليوم ـ نيون ، الذى يبلغ خرجه نحو ميللي وات فحسب ، إلا أن هناك عددًا كبيرًا من أنواع الليزر المتاحة حاليًا ، وجميعها تحتاج إلى تواجد حالة مؤقتة الاستقرار حتى يتكون انقلاب التوزيع ، ويؤدى الانبعاث المستحث ، من ثَمّ إلى ظهور مجموعة مترابطة من الموجات المتفقة في الطور . وتتفاوت هذه الأنواع من حيث الطول الموجي الذى يتراوح بين الأشعة تحت الحمراء البعيدة وأشعة إكس الطويلة . كما تتراوح قدراتها من كسر صغير من الميللي وات (في حالة الليزر المستخدم في الأجهزة الصوتية لأسطوانات مدمجة مثلاً) إلى ملايين الواتات

(فى حالة الليزر المستخدم فى بحوث الاندماج النووى الذى سنناقشه فى الفصل القادم) .

لقد أصبح الليزر - بعد أربعين سنة منذ افتتاحه - واحدًا من أكثر المنتجات التطبيقية للبحوث الفيزيائية انتشارًا . ويتيح ترابط ضوئه تسجيل معلومات ذات طور وشدة فوتوغرافيا من خلال عملية صارت تعرف باسم **هولوجرافيا** (أو التصوير الهولوجرافى) . وتبرز الصور الهولوجرافية الأبعاد الثلاثة للجسم الذى التقطت له الصورة . كما يسمح ترابط الأشعة بتركيزها فى بؤرة ذات مساحة صغيرة للغاية ، مما يوفر حزمة ضوئية دقيقة للغاية وذات شدة بالغة فى نفس الوقت . وهذا ما أتاح للجراحين أن يدمروا الأنسجة المصابة فى نقط محددة بعناية أو أن يقوموا « بلحام » الأنسجة المزقة ، كما فى حالة الانفصال الشبكى . كما أن حزمة الليزر قادرة على اختراق المواد بشكل أسرع وأدق من آلات الثقب المألوفة . واستقامة حزمة الليزر ؛ تجعلها ذات فائدة فى عمل المسح والتحكم فى عمليات الآلات المختلفة والعمليات الصناعية التى يستخدم فيها « الإنسان » الآلى .

وترتبط أجهزة الليزر حاليًا مع أجهزة الكومبيوتر بطرق عديدة ، كما فى حالة قراءة شفرة القضبان (باركورد) المثبتة على معظم البضائع التى نشتريها . وتستخدم أجهزة ليزر الحالة الصلبة فى أنظمة الأقراص المدمجة المسموعة والمرئية ، حيث ينعكس شعاع الليزر من على الأشكال المرقمة المحفورة على القرص ، ثم تحول إلى إشارات إلكترونية يقوم الكومبيوتر بتحليلها وتحويلها إلى أشكال من إشارات الجهود الكهربية التى تدير مكبرات الصوت وخرج أجهزة تسجيل الفيديو .

وستظهر تطبيقات جديدة لليزر بشكل متنامى فى المستقبل ، مثل نقل الإشارات عن طريق تضمين (تعديل) الضوء المرئى وتخزين الذاكرة البصرية فى أجهزة الكومبيوتر .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) الذرة النووية ، (ب) الطيف الخطى والمستمر ، (جـ) حد السلسلة ، (د) ثابت ريدبرج ، (هـ) سلاسل ليمان ، بالمر ، وباشن ، (و) مدارات بوهر ونصف قطر بوهر ، (ز) الرسم البيانى لمستويات الطاقة ، (ح) الحالة الأرضية ، (ط) طاقة التأين ، (ى) الأعداد الكمية : الرئيسى والمدارى والمغناطيسى واللف ، (ك) قشرة الطاقة والقشرة الفرعية ، (ل) مبدأ باولى للاستبعاد ، (م) أشعة إكس المميزة وأشعة الفرملة ، (ن) الموجات المترابطة ، (س) الانبعاث المستحث ، (ع) الحالة شبه المستقرة (مؤقتة الاستقرار) ، (ف) انقلاب التوزيع ، (ص) الليزر .

2 أن تشرح كيف قدمت تجربة رذرفورد دليلاً على مفهوم الذرة النووية .

3 أن تذكر قطر الذرة بالتقريب .

4 أن ترسم خطوط سلسلة بالمر وتكتب معادلة بالمر . أن تحسب الطول الموجى لخط معين فى سلسلة بالمر إذا علم ثابت ريدبرج . أن تكرر الحسابات بالنسبة لسلسلة ليمان وسلسلة باشن .

5 أن تشرح كيف تؤدى الخواص الموجية للإلكترون إلى وجود مدارات بوهر ومستويات طاقة بوهر .

6 أن تذكر الصيغة العامة لمستويات طاقة ذرة الهيدروجين بالإلكترون فولت . وأن تنفذ الرسم البيانى لمستويات طاقة الهيدروجين .

7 أن تحسب الطول الموجى الذى تطلقه ذرة الهيدروجين فى أى انتقال محدد . وأن تبين على الرسم البيانى لمستويات الطاقة كيفية ظهور سلاسل ليمان ، وبالمر ، وباشن .

8 أن تشرح السبب فى أن ذرات الـهيدروجين تمتص فى العادة الأطوال الموجية لسلسلة ليمان وليس الأطوال الموجية لسلسلة بالمر .

9 أن تشرح معنى الرسم البيانى للتوزيع الإلكترونى مثل الذى تبينه الأشكال 15–27 ، 16–27 .

10 أن تستخدم مبدأ باولى للاستبعاد فى تحديد التوزيع الإلكترونى للحالة الأرضية بالنسبة لعناصر بسيطة . وأن تشرح كيف يتنبأ مبدأ الاستبعاد بالنشاط الكيميائى (التكافؤ) لـهذه العناصر .

11 أن تصف كيف يتم توليد أشعة إكس فى أنبوبة أشعة إكس . وأن تحسب أقصر طول موجى لأشعة إكس يتم إشعاعه من هدف يقذف بإلكترونات ذات طاقة معينة .

12 أن تشرح مبدأ الليزر الغازى بدلالة الحالات شبه المستقرة ، وانقلاب التوزيع ، والانبعاث المستحث . وأن تذكر الملامح المهمة لحزمة ليزر من حيث الترابط والطور والشكل . أن تشير إلى أثر هذه الملامح فى تحديد الاستخدامات العريضة لأجهزة الليزر .

ملخص

وحدات مشتقة وثوابت فيزيائية

ثابت ريدبرج (R)

$$R = \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 k_e^2 m}{h^3 c}$$

وبالنسبة للـهيدروجين ، $Z = 1$ و $R = 1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

نصف قطر بوهر (r_1)

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 Z e^2 m k_e}$$

وبالنسبة للـهيدروجين ، $Z = 1$ و $r_1 = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$

تعريفات ومبادئ أساسية :

السلاسل الطيفية لذرة الـهيدروجين

تبعث ذرة الـهيدروجين وتمتص الإشعاع الكهرومغناطيسى على هيئة سلاسل من الأطوال الموجية تتحدد بالمعادلة العامة التالية :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2}\right)$$

والرمزان i و j يعبران عن أعداد صحيحة . ولكل سلسلة من الأطوال الموجية قيم محددة للعدد i . وللحصول على الأطوال الموجية المنفردة فى سلسلة ما نضع قيمًا للعدد j بحيث تكون أرقامًا صحيحة أكبر من i .

خلاصة

1 سلاسل الأطوال الموجية الثلاث الأولى هى

سلسلة ليمان (فوق البنفسجية) $i = 1$

سلسلة بالمر (المرئية) $i = 2$

سلسلة باشن (تحت الحمراء) $i = 3$

2 لكل سلسلة قيمة صغرى للأطوال الموجية تسمى حد السلسلة وتناظر العدد $j = \infty$. وهذا الحد يعطى من

$$\frac{1}{\lambda_\infty} = \frac{R}{i^2}$$

المدارات المستقرة ومستويات طاقة ذرة هيدروجين بوهر

تتحدد أنصاف أقطار المدارات المستقرة بالمعادلة :

$$r_n = n^2 r_1$$

حيث n أي عدد صحيح و r_1 هو نصف القطر الأول لبوهر

وتتخذ الإلكترونات في ذرة بوهر الطاقات الكلية التي تحددها المعادلة :

$$E_n = \frac{-Ze^2k_e}{2r_n} = -\frac{E_1}{n^2}$$

حيث $E_1 = \frac{-Ze^2k_e}{2r_1}$ هي أدنى طاقة وتعرف بالحالة الأرضية .

خلاصة

1 E_n هي مجموع طاقتي الحركة والوضع الكهربية ، حيث تكون في كل مستوى طاقة $\text{KE} = \frac{+Ze^2k_e}{2r_n}$ و $\text{PE} = \frac{-Ze^2k_e}{r_n}$.

2 عندما تكون E_n سالبة فإن الإلكترون يكون فى حالة مقيدة . وحتى يتحرر الإلكترون (بتأيين الذرة) فإن حدًا أدنى من الطاقة الموجبة مساوٍ للطاقة E_n لابد من تقديمه للإلكترون .

3 بالنسبة للهيدروجين ، $E_1 = -13.6\ \text{eV}$.

الأعداد الكمية ومبدأ باولى للاستبعاد

الأعداد الكمية الأربعة هى التى تحدد حالة إلكترون ما فى ذرة ما :

الرئيسى : $n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$

المدارى : $l = 0, 1, 2, \ldots\ldots, n-1$

المغناطيسى : $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots\ldots \pm l$

اللف : $m_s = \pm \frac{1}{2}$

ينص مبدأ الاستبعاد على أنه لا يمكن لاثنين من الإلكترونات فى ذرة واحدة أن يتخذا نفس الأعداد الكمية الأربعة ؛ أى أنهما لا يستطيعان احتلال نفس الحالة فى ذرة ما .

خلاصة

1 يحدد العدد الكمى الرئيسى طاقة الحالة . وحيث أن هناك عدة قيم ممكنة للأعداد l ، m_l ، m_s لكل n فإن عددًا من الإلكترونات قد تتخذ نفس مقدار الطاقة دون احتلال نفس الحالة الكمية .

2 يفسر مبدأ الاستبعاد ترتيب وتكافؤ إلكترونات الحالة الأرضية بالجدول الدورى للعناصر .

أسئلة وتخمينات

1 لماذا لا يقوم غاز الهيدروجين الذى يحضره التلاميذ فى المعمل بالتوهج وإطلاق الضوء ؟

2 هب أن لديك أنبوبة زجاجية بها قطبان وطرفاها مسدودان بإحكام . وأن الغاز المحبوس بداخلها هو إما هيدروجين أو هليوم . كيف تعرف نوع الغاز دون أن تكسر الأنبوبة ؟ ولو كان الغاز تحت ضغط مرتفع فما هى الصعوبات التى قد تواجهك ؟

3 عندما يخترق ضوء أبيض وعاءً يحتوى على غاز الهيدروجين فإن من المشاهد أن أطوال الموجات المناظرة لسلسلة بالمر وكذلك المناظرة لسلسلة ليمان يتم امتصاصها . ونستنتج من هذا أن الغاز ساخن جدًا . لماذا خطر لنا هذا الاستنتاج ؟ (الواقع أن

هذا هو أساس إحدى طرق قياس درجة حرارة غاز ساخن) .

4 اشرح بوضوح السبب في أن خطوط انبعاث أشعة إكس في المدى 0.1 nm لا تشاهد في حالة أنبوبة أشعة إكس يستخدم فيها هدف مصنوع من فلز ذى عدد ذرى منخفض .

5 ترتاب إحدى شركات الصلب في أن أحد منافسيها يضيف إلى منتجاته كسرًا من نسبة مئوية من عنصر أرضى نادر . كيف يمكن معرفة هذا العنصر بسرعة وتحديد تركيزه في المنتج ؟

6 يقع إلكترونا ذرة الهليوم في نفس قشرة الطاقة ولكنهما يتجنبان بعضهما البعض إلى درجة يصبح معها تفاعلهما ذا أهمية ثانوية . ضع تقديرًا لطاقة تأين الهليوم (بالإلكترون فولت) ، أى للطاقة اللازمة لاقتلاع أحد الإلكترونين وتحريره . ثم ضع تقديرًا للطاقة اللازمة لاقتلاع وتحرير الإلكترون الثانى . أى هاتين القيمتين أكثر وثوقًا ويمكن الاعتماد عليها ؟

7 تبلغ طاقات التأين لليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم 5.4 ، 5.1 ، 4.3 eV على الترتيب ، كما تكون تلك الطاقات في حالة الهليوم ، والنيون ، والأرجون 24.6 ، 21.6 ، 15.8 eV على الترتيب . اشرح بطريقة وصفية وفي إطار التركيب الذرى السبب في أن هذه القيم هي المتوقعة .

8 احسب مقدار الطاقة التي على أحد الفوتونات أن يتخذها حتى يكون قادرًا على انتزاع إلكترون من أعمق قشرة في ذرة الذهب .

مسائل

القسم 27-1

1 يبلغ نصف قطر نواة الذهب نحو 6×10^{-15} m ونصف قطر ذرته نحو 0.150 nm . تخيل أنك ترغب في رسم ذرة الذهب بمقياس رسم مناسب مستخدمًا نقطة قطرها 0.10 mm لتمثل النواة . ما هي المسافة التي يجب أن ترسم عندها الحافة الخارجية للذرة ، بعيدًا عن مركز النقطة ؟

2 سددت حزمة منتظمة مكونة من 10,000 مقذوف ضئيل نحو نافذة مساحتها $0.5\ m^2$ وكان جزء من زجاجها مكسورًا ، وكانت مساحة الحزمة هي نفس مساحة النافذة . (أ) إذا لم ينفذ عبر النافذة سوى 800 مقذوف ، فما هي مساحة الفجوة في زجاج النافذة ؟ (ب) ثم أزيل الزجاج كله تمامًا وعلقت 400 كرة صغيرة من خيوط في فتحة النافذة ، فمر 9200 مقذوفًا من أصل 10,000 عبر النافذة في خطوط مستقيمة . كم تبلغ مساحة المقطع المستعرض لكل كرة تقريبًا ؟ (جـ) ما هو الشيء الذى يناظر الكرات الواردة في الجزء (ب) من تجربة رذرفورد ؟

■ 3 لقد صوب رذرفورد ومساعدوه جسيمات ألفا (شحنتها $q = 2e$) نحو ذرات الذهب $(Z = 79)$. وكانت طاقة حركة بعض الجسيمات 4.8 MeV . (أ) ما هي طاقة وضع أحد جسيمات ألفا (بدلالة r) عند نقطة تبعد مسافة r من نواة الذهب ؟ ما هي أقصر مسافة يمكن لجسيمات رذرفورد أن تقترب بها من مركز نواة الذهب ؟ افترض أن نواة الذهب تظل ساكنة ، وإهمل تأثير الإلكترونات الذرية البعيدة .

4 تبلغ كثافة الذهب $19.3\ g/cm^3$ وكتلته الذرية 197 kg/mol . (أ) ما هي كتلة ذرة الذهب ؟ (ب) كم عدد ذرات الذهب في مساحة مقدارها $1\ cm^2$ من غشاء ذهبي سمكه 0.040 mm ؟ (جـ) قطر نواة الذهب نحو 10^{-14} m ، فإذا افترضنا عدم وجود تراكب بين النوى فما هو الجزء من مساحة مقدارها $1\ cm^2$ سوف تغطيه أنوية الذهب ؟ (د) وإذا كان رذرفورد قد استخدم غشاءً بهذا السمك ، فما هو كسر جسيمات ألفا التى ستنحرف بشدة ؟

5 تخيل أن جسيمات ألفا التي سرعتها 2.0×10^7 m/s قد أطلقت على ذرات الرصاص $(Z = 82)$. إلى أى مدى يمكن لجسيمات ألفا أن تقترب من مركز نواة الرصاص ؟

6 ما هي مسافة أدنى اقتراب لجسيمات ألفا التي سرعتها 1.8×10^7 m/s من نواة النحاس $(Z = 29)$ ؟

القسمان 2-27 و 3-27

7 احسب نصف قطر مدار بوهر الأول والثاني والثالث لذرة الـهيدروجين .

■ 8 إثبت باستخدام النموذج شبه الكلاسيكي لذرة الـهيدروجين أن سرعة الإلكترون v_n الموجود في مدار بوهر رقـم n ، تعطى بالعلاقة $v_n = 2\pi ke^2/nh$.

■ 9 احسب سرعة الإلكترون المتوقعة كلاسيكيا في مداري بوهر الأول والثاني . ثم قارن هاتين القيمتين بسرعة الضوء c .

■ 10 احسب كمية التحرك الزاوية لإلكترون في المدار الأول لبوهر .

■ 11 ما هي طاقة حركة إلكترون في المدارين الأول والثاني لبوهر في ذرة هيدروجين ؟

■ 12 احسب طاقة وضع إلكترون في ذرة هيدروجين عندما تكون في حالتها الأرضية .

13 يدور إلكترون في ذرة الـهليوم وحيدة التأين حول النواة ذات الشحنة $+2e$. احسب نصف قطر مدار بوهر الأول $(n = 1)$ والثاني $(n = 2)$ لـهذا الأيون .

14 احسب أدنى ثلاث مستويات طاقة لذرة الـهليوم وحيدة التأين ، والتي وردت في المسألة رقم 13 .

15 تخيل أن النظرية شبه الكلاسيكية للذرة قابلة للتطبيق على أعمق إلكترون في ذرة الذهب $(Z = 79)$ ، إذا تم إهمال وجـود جميع الإلكترونات الأخرى . (وهذا التقريب ليس سيئًا جدًا في واقع الأمر) . (أ) إثبت أن الطاقة اللازمة لإزالـة هـذا الإلكترون من الذرة هي 13.6×79^2 eV . (ب) ما هو نصف قطر مدار بوهر الأول بالنسبة لـهذه الذرة ؟

■ 16 تخيل أن إلكترونًا يدور حول نواة الـهيدروجين داخل مدار دائري نصف قطره 0.50×10^{-10} m . (أ) مـا هـي السرعة التي يتحرك بها الإلكترون إذا اعتبرنا أن قوة كولوم تمثل قوة الجذب المركزي ؟ (ب) ما هو تردد الإلكترون في هـذا المدار ؟ (جـ) ما هو الطول الموجي للإشعاع الذي يبثه هذا الإلكترون ، على أساس النظرية الكلاسيكية .

■ 17 هب أن لديك ذرة ليثيوم ثنائية التأين $(Z = 3)$. (أ) احسب أدنى ثلاثة مستويات طاقة لـهذا الأيـون . (ب) مـا مقدار الطاقة اللازمة لإزالة آخر إلكترون من ذرة الليثيوم ثنائية التأين ؟

■ 18 تخيل أن ذرة النيتروجين $(Z = 7)$ قد انتزع منها ستة إلكترونات . احسب نصف قطر المدار الأول لبوهـر وطاقـة الحالـة الأرضية ، والطاقة اللازمة لإزالة آخر إلكترون من هذه الذرة .

■ 19 أعد المسألة رقم 18 بالنسبة للصوديوم $(Z = 11)$ الذي انتزع من ذرته عشرة إلكترونات .

القسمان 4-27 و 5-27

20 احسب الطول الموجي للخطوط الأربعة الأولى في سلسلة بالمر .

21 قارن بين الطولين الموجيين للخطين الثالث عشر والرابع عشر في سلسلة بالمر . ماذا تستنتج من هذه الأرقام ؟

22 قارن بين الطولين الموجيين للخط السادس في سلسلة بالمر والخط الأول في سلسلة ليمان .

23 احسب الأطوال الموجية للفوتونين اللذين لـهما أقصر طول موجي وأطول طول موجي في سلسلة باشن .

24 قارن بين الطول الموجي للفوتون الذي له أطول طول موجي في سلسلة بالمر والطول الموجي للفوتـون الـذي لـه أقصـر طـول موجي في سلسلة باشن .

25 احسب طاقة الفوتون الذي إذا امتصته ذرة هيدروجين ، تسبب في انتقال إلكتروني من الحالة الابتدائية $n = 2$ إلى الحالة النهائية $n = 5$.

■ 26 قذفت إلكترونات طاقتها 10.9 eV نحو غاز من ذرات الـهيدروجين . ما هو الطول الموجي للإشعاع الذي ينبعث بقوة من الغاز ؟

▪ 27 قذفت إلكترونات طاقتها 12.9 eV نحو غاز من ذرات الـهيدروجين . ما هو الطول الموجي للإشعاع الذى ينبعث بقوة من الغاز ؟

▪ 28 إذا مر طيف مستمر خلال غاز هيدروجين غير ساخن ؟ فما هى الفوتونات التى لـها أول أدنـى خمس طاقات ، تمتص بواسطة الغاز ؟

▪ 29 ما هى طاقات الفوتونات التى لـها أدنى ثلاث طاقات والتى امتصتها ذرات الـهليوم أحادية التأين غير المستثارة ؟ وما هى أطوالـها الموجية ؟

▪ 30 تمر حزمة من ضوء فوق بنفسجي طوله الموجي 72 nm خلال غاز من ذرات الـهيدروجين غير المستثارة . فإذا اصطدم أحد الفوتونات بذرة ما وأطلق منها إلكترونًا ، فما هى طاقة حركة هذا الإلكترون بمجرد تحرره من الذرة ؟ (هذا هو ما يسمى **الأثر الكهروضوئي الذرى**) .

▪ 31 تسقط حزمة من أشعة إكس التى طولـها الموجي 5.0 nm على غاز من ذرات الـهيدروجين غير المستثارة فتقوم بانتزاع الإلكترونات الذرية الضوئية من ذرات الـهيدروجين . (أ) ما هى طاقة الإلكترونات المنتزعة ؟ (ب) وما هى سرعتها ؟

▪ 32 طاقة تأين ذرات الـهليوم غير المستثارة هى 24.6 eV . تخيل أن إشعاعًا فوق بنفسجي طوله الموجي 40 nm يسقط على تلك الذرات . (أ) ما هى طاقة أسرع إلكترون ينطلق من الذرات بواسطة الإشعاع فوق البنفسجي ؟ (ب) وما هى سرعة هذا الإلكترون ؟

▪ 33 قذف غاز من ذرات الـهيدروجين عند درجة حرارة الغرفة بواسطة حزمة من الإلكترونات التى عجلت عبر فرق للجهد مقداره 13.3 V . ما هو الطول الموجي للضوء الذى يشعه الغاز نتيجة لـهذا القذف ؟

الأقسام من 6-27 إلى 8-27

34 ما هو طول دى برولى الموجي لإلكترون فى مدار بوهر الرابع ؟

35 احسب عدد الإلكترونات التى يمكن أن تتواجد في القشرات (أ) $n = 3$ و (ب) $n = 5$ فى ذرة من نوع ذرات بوهر .

36 احسب طول دى برولى الموجي للإلكترونات الموجودة فى مدارات بوهر فى المسألة رقم 35 .

37 ما عدد القشرات الفرعية المدارية الممكنة بالنسبة للمستوى الذرى الذى يميزه العدد الكمي الرئيسـى $n = 3$ ؟

▪ 38 تعرَّف القشرة الفرعية الذرية على أنها مجموعة إلكترونات فى ذرة ما ، يكون لـها نفس العدد الكمي الرئيسـى n والعدد الكمي المدارى l ، ولكن لـها أعداد كمية مغناطيسية m_l وأعداد لف كمية m_s مختلفة . استخدم هذه الحقائق فـى إيجاد عدد الإلكترونات التى توجد فى القشرة الفرعية $n = 3$ ، $l = 2$ فى الذهب .

▪ 39 ما عدد الحالات المغناطيسية الفرعية الممكنة فى قشرة فرعية لـها الأعداد الكمية $n = 3$ ، $l = 1$ ؟ وما عـدد الإلكترونات اللازمة لملء هذه القشرة الفرعية ؟

▪ 40 لديك حالة من نوعية حالات بوهر ، عددها الكمي الرئيسى $n = 4$. ما عدد القيم الممكنة عند (أ) العدد الكمي المدارى l و (ب) العدد الكمي المغناطيسى m_l ؟

▪ 41 ما عدد المجموعات المختلفة من الأعداد الكمية (l ، m_l ، m_s) بالنسبة لإلكترون عدده الكمي الرئيسى هو (أ) $n = 3$ ، (ب) $n = 4$ ، (جـ) $n = 5$ ؟

▪ 42 هب أن لديك إلكترونين موجودين فى نفس النظام ويتخذ كل منهما الأعـداد الكمية $n = 3$ و $l = 0$. (أ) تخيل أن للإلكترونين لف ولكن مبدأ الاستبعاد غير مطبق . كم عدد الحالات سيكون ممكنًا بالنسبة للإلكـترونين ؟ ، (ب) ما عـدد الحالات المسموح بها إذا كان مبدأ الاستبعاد مطبقًا ؟

▪ 43 اعتبر نظامًا ليس للإلكترونات فيه لف ولـهذا لا يوجد عدد كمي للف . كم عدد الإلكترونات يمكن أن يوجـد فـى الحالة

التي عددها الكمي الرئيسي $n = 3$ ؟

■ 44 إذا اعتبرنا الظروف الواردة في المسألة رقم 43 ، فما هي أول أربعة عناصر في الجدول الدوري يكون تكافؤها 1 + ؟

■ 45 كون جدولاً تبين فيه الأعداد الكمية للإلكترونات المختلفة في ذرة الصوديوم $(Z = 11)$.

■ 46 اكتب قيم مجموعة الأعداد n ، l ، m_l ، m_s بالنسبة لإلكترونات ذرة الأكسجين $(Z = 8)$.

■ 47 اكتب مجموعات الأعداد الكمية لإلكترونات ذرات (أ) النيون $(Z = 10)$ و (ب) البوتاسيوم $(Z = 19)$.

القسم 9-27

48 تستخدم في أجهزة التليفزيون الملون الحديثة عادة حزم إلكترونية معجلة عبر فرق للجهد يزيد على 20,000 V . ما هو أقصر طول موجي لأشعة إكس التي تولدها حزمة معجلة في 24,000 V عندما تصطدم بنهاية أنبوبة التليفزيون ؟ (لم تكن أجهزة التليفزيون قديمًا مدرعة بشكل صحيح ولذا كانت كميات كبيرة من أشعة إكس تتسرب خارج الجهاز) .

49 تستخدم أشعة إكس التي توصف بأنها « حادة » وذلك للوصول إلى الأورام السرطانية الموجودة داخل عمق جسد المريض . ويتم توليد هذه الأشعة باستخدام جهود مرتفعة جدًا . ما هو أقصر طول موجي لأشعة إكس التي تنتج من أنبوبة أشعة إكس تعمل عند 148 kV ؟

50 ما هو الحد الأدنى للجهد الممكن استخدامه في أنبوبة أشعة إكس ، تنتج أشعة إكس طولها الموجي 0.045 nm ؟

■ 51 يستخدم التنجستين كهدف في أنبوبة أشعة إكس $(Z = 74)$ (أ) ما هو الحد الأدنى لفرق الجهد المطلوب إذا كان الإلكترون $n = 1$ هو الذي سيستثار ؟ (ب) ما هو أطول طول موجي لأشعة إكس المنبعثة عندما يحدث للذرة انتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$ ؟

■ 52 يطلق على أكبر الخطوط شدة في طيف أشعة إكس للمواد المستخدمة كأهداف في أنابيب أشعة إكس ـ الخط K_α . وينشأ هذا الخط حسب نظرية بوهر عندما تنتقل الذرة من الحالة $n = 2$ إلى الحالة $n = 1$. ما هو الطول الموجي للخط K_α بالنسبة لهدف مصنوع من عنصر الكروم $(Z = 24)$ ؟

■ 53 ما هي الأطوال الموجية لخطوط أشعة إكس K_α الناتجة من (أ) الرصاص $(Z = 82)$ و (ب) الزركون $(Z = 40)$ ؟

■ 54 ما هو الحد الأدنى لفرق الجهد اللازم في أنبوبة أشعة إكس لكي يستثير إلكترونًا في $n = 1$ إذا كان الهدف مصنوعًا من (أ) النيكل $(Z = 28)$ و (ب) الألمونيوم $(Z = 13)$ ؟

■ 55 ما هو فرق الطاقة بين المستويين $n = 2$ و $n = 3$ لعنصر الموليبدنم $(Z = 42)$ ؟ وما هو الطول الموجي لأشعة إكس المنبعثة عندما تنتقل ذرات الموليبدنم من المستوى $n = 3$ إلى المستوى $n = 2$ ؟

القسم 10-27

■ 56 تستخدم نبضة ضوء من ليزر الأرجون $(\lambda = 456.5\ nm)$ في « لحام » شبكية منفصلة في عين شخص مصاب . فإذا دامت النبضة 1×10^{-8} s وتحمل من الطاقة 1.6×10^{-3} J . فكم تكون القدرة اللحظية الواصلة إلى نقطة اللحام ؟

■■ 57 تتفرق حزمة ليزر بشكل طفيف بسبب تأثيرات الحيود عند طرف أنبوبة الليزر . افترض أن حزمة ليزر هليوم ـ نيون $(\lambda = 633\ nm)$ ذات قطر مقداره 2.8 nm عند مغادرتها لأنبوبة الليزر . كم سيبلغ قطر الحزمة عندما تصطدم بهدف يبعد عن الأنبوبة 160 m ؟ اعتبر أن انتشار الحزمة مرده الوحيد إلى الحيود .

■■ 58 إذا أطلق جهازا ليزر موجات لها نفس الطول الموجي ، فإن حزمتين منطلقتين من الجهازين ومن نفس النوع ستكونان مترابطتين . وحتى لو اختلف الطول الموجي بشكل طفيف فإن الحزمتين سوف تحدثان آثارًا تداخلية . وعند ربط الحزمتين فإنهما تعطيان حزمة محصلة تتراوح مع الزمن بين السطوع والإظلام وهذا شبيه بظاهرة النبضات في الموجات الصوتية التي

عالجناها في فصل سابق فإذا كان الطول الموجي لإحدى الحزمتين 632 nm تماما ، فكم يجب أن يكون الطول الموجي للحزمة الأخرى حتى يحدث أقصى سطوع مرة كل ثانية ؟ **تلميح** : استخدم حقيقة أنه عندما تكون $x \ll 1$ فإن $\frac{1}{1 \pm x} \cong 1 \mp x$

مسائل عامة

■■ 59 افترض أن كمية التحرك الزاوية لدوران الأرض حول الشمس تحقق شرط الرنين بالنسبة لموجات دى بـرولى $n\lambda_n = 2\pi r_n$. كم ستكون قيمة العدد الكمى n فى هذه الحالة ؟ (يعتبر هذا مثالاً على مبدأ بوهـر للتنـاظر الـذى ينـص علـى حقيقـة أن النظم الماكروسكوبية (الكبيرة) كالأرض ، تناظر عادة أعدادًا كمية كبيرة جدًا ولذلك فهى تتصرف بشكل كلاسيكى) .

■■ 60 إن ذرة هيدروجين ذات مدار قطره عدة أمتار ستتصرف ـ كلاسيكيًا ـ كهوائى الراديو وتبث إشعاعًا تـردده يسـاوى تـردد إلكترون فى المدار . ولابد أن تتنبأ النظرية الموجية بهذه النتيجة ، وذلك لأنها تنطبق على هوائيات اللاسلكى مثلما تنطبق على الذرات . اثبت أن التردد المدارى للإلكترون يعطى بالعلاقة : $f_{\text{orb}} = \dfrac{me^4}{4\epsilon_0^2 h^3 n^3}$

احسب التردد المنبعث من ذرة الـهيدروجين عندما تهبط من الحالة n إلى الحالة $n - 1$. اثبت أنه عندما يكـون n كبـيرًا جدًا ($n \gg 1$) فإن هذا التردد يكون هو نفسه التردد المدارى f_{orb} .

■■ 61 اعتبر الانتقالات الإلكترونية الأربعة الممكنة التالية لذرة الـهيدروجين : (1) من $n = 2$ إلى $n = 5$ ، (2) من $n = 3$ إلى $n = 6$ ، (3) من $n = 7$ إلى $n = 4$ ، (4) من $n = 4$ إلى $n = 1$. (أ) أى الانتقالات ينبعث منـه فوتـون ذو أطـول طـول موجـى ؟ (ب) عند أى انتقال تمتص الذرة أقصى طاقة ؟

■■ 62 تخيل أن نواة ذرية تتكون من بروتونات ونيوترونات لا تفاعل بينها ؛ وأنها تتحرك فى مسارات دائرية داخل النـواة . وحيث أن نصف قطر النواة النموذجية الكبيرة نحو 5×10^{-15} m ، فلنـا أن نعتبر أن الجسـيمات فـى الحالـة الأرضيـة سيكون نصف قطر مدارها 5×10^{-15} m . كم يجب أن يكون طول دى برولى الموجى بالنسبة لبروتون فى حالـة رنـين فـى مثل هذا المدار وفى حالته الأرضية ؟ وما هى طاقة جزئ البروتون (بالإلكترون فولت eV) ؟ إهمل تأثيرات النسبية .

■■ 63 لجزئ البنزين محيط على هيئة شكل مسدس طـول كـل مـن أضلاعـه 0.140 nm . وحيـث أن للجـزىء ثـلاث روابـط مزدوجة ، فلا يكون من غير العقول أن نعتبر أن إلكترونًا واحدًا يستطيع فـى الجـزىء أن يـدور بحريـة فـى دائـرة حـول محيط الجزىء كما لو كان إلكترونًا حرًا يتحرك فى مسار مسدس الشكل . وباستخدام الاستدلال المنطقى المبنى على الرنين والطول الموجى لدى برولى ، اثبت أن مستويات الطاقة لـهذا الإلكترون لابد وأن تعطى (فى ظل هذا التقريب) بالمعادلة :

$$E_n = (7.1 \times 10^{17}) \frac{n^2 h^2}{m}$$

مع اعتبار أن كل الكميات معبر عنها بوحدات SI . ولو أن نتيجة هذه الحسابات صحيحة ، فعند أى طول موجـى علينـا أن نتوقع امتصاص حلقة البنزين للضوء ؟ . وهل يتناقض هذا مع حقيقة أن البنزين سائل رائق كالبللور ؟

■■ 64 (أ) احسب سرعة ارتداد ذرة هيدروجين نتيجة إطلاقها لفوتون طوله الموجى 486 nm ، وهو الخط الثانى فى سلسـلة بالمر . (ب) أوجد نسبة طاقة الارتداد هذه إلى الفرق فى الطاقة بين حالتين تتسببان فى ظهور خط الانبعاث .



يوجد فى مركز الذرة تمامًا ـ كما أوضح رذرفورد عام 1911 ـ نواة موجبة الشحنة . وعلى الرغم من أنها لا تشكل إلا نحو 10^{-13} بالمائة من حجم الذرة إلا أن بها 99.9 بالمائة من كتلة الذرة . وسنقوم في هذا الفصل بفحص الملامح البارزة للنواة ومم تتكون وما هي العوامل التي تؤثر على استقرارها . كما سنعالج عددًا قليلاً من التطبيقات العديدة للفيزياء النووية فى عالمنا المعاصر .

28-1 العدد الذرى وعدد الكتلة

امتدت بحوث رذرفورد التى تناولناها فى الفصل السابع والعشرين ، فى نواحى كثيرة مع مرور الزمن . وأصبحنا نعرف ـ حاليًا ـ أن النواة تتركب من بروتونات (p) ونيوترونات (n) ، وقد أطلق على هذه الجسيمات **نويّات** نظرًا لأنها تسكن داخل النواة . ولعلك تذكر أن شحنة البروتون +e وأن النيوترون لا شحنة له ، كما أن كتلتى هذين الجسيمين هما :

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.007277\ \text{u}$$

و

$$m_n = 1.675 \times 10^{-27}\ \text{kg} = 1.008775\ \text{u}$$

حيث تسمى وحدة الكتلة u **وحدة الكتل الذرية** (وتكتب أحيانا amu) . وسنقوم

بوضع تعريف لهذه الوحدة بشكل دقيق فى القسم 2–28 . أما الآن فسنؤكد فقط أن :

$$1\ \mathrm{u} = 1.660566 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

يلاحظ أن كتلتي النيوترون والبروتون متساويتان تقريبًا وليس تمامًا . ولكل من البروتون والنيوترون عدد لف مقداره $\frac{1}{2}$ ، مثل الإلكترون ، ويخضعان لمبدأ باولى للاستبعاد . ومن قبيل المقارنة ، نجد أن كتلة الإلكترون :

$$m_e = 9.1094 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg} = 5.486 \times 10^{-4}\ \mathrm{u}$$

وكما ذكرنا فى الفصل السابع والعشرين ، فإن العدد الذرى Z يحدد عدد البروتونات فى نواة ذرة ما . وتحتوى الذرات المتعادلة (أى غير المؤينة) على Z إلكترون فى الحيز الواقع خارج النواة . ويتحدد السلوك الكيميائى لذرة ما بواسطة هذه الإلكترونات ، ولذلك تنتمى الذرات التى لها نفس العدد الذرى ، إلى نفس **العنصر** فكل ذرة كربون - مثلاً ، تحتوى على ستة إلكترونات ، ولكل ذرة ذهب 79 إلكترونًا . ويحتوى الملحق رقم 1 على الأعداد الذرية للعناصر .

وكتلة النواة أكبر من كتلة البروتونات التى عددها Z بسبب وجود النيوترونات داخل النواة (يستثنى من هذا الهيدروجين) . ويرمز لعدد النيوترونات فى النواة بالرمز N .

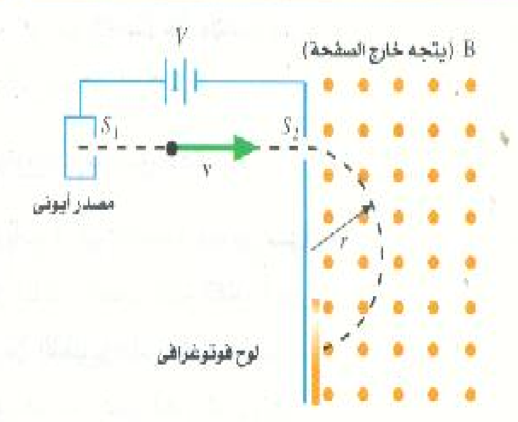
وحيث أن كتلة كل نوية قريبة من $1\ \mathrm{u}$ ، فلنا أن نتوقع أن تكون الكتلة النووية عددًا صحيحًا تقريبًا ، إذا عبرنا عنها بوحدات الكتل الذرية ، وهذا - فى الواقع - هو ما يحدث ، فكتلة نواة الهليوم ، مثلاً ، والتى تحتوى على بروتونين ونيوترونين ، هى $4.0026\ \mathrm{u} \approx 4\ \mathrm{u}$ ، بينما تصل كتلة نواة الأرجون $(Z = 18, N = 22)$ إلى $39.96\ \mathrm{u} \approx 40\ \mathrm{u}$ إذا استقر هذا فى الأذهان ؛ فيمكننا أن نميز كل نواة **بعدد الكتلة** A ، وهو يساوى عدد النويات داخل النواة : $A = Z + N$. وعدد الكتلة قريب جدًا من كتلة النواة مقاسة بوحدات الكتل الذرية .

28–2 الكتل النووية ؛ النظائر

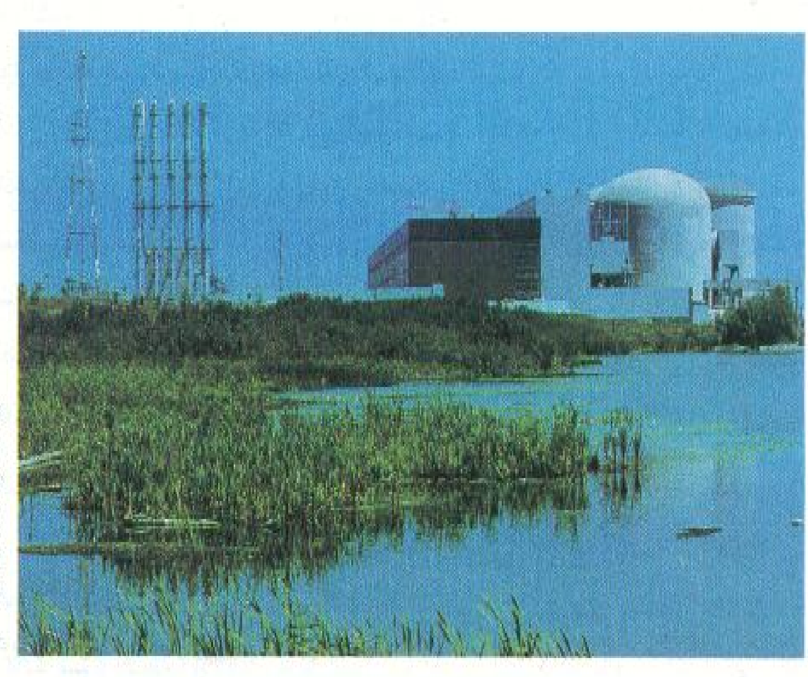
لقد تم قياس كتل النوى بدقة مرتفعة باستخدام أجهزة مطياف الكتلة الذى درسناه فى القسم 8–19 ، ويوضح الشكل 1–28 رسمًا بيانيًا تخطيطيًا لأحد أنواع ذلك الجهاز . وفيه يسمح لأيونات العنصر - المطلوب دراسته - بالهروب من المصدر الأيونى كما هو مبين بالشكل ؛ ثم تعجل حزمة الأيونات عبر فرق للجهد مقداره V ، ويتم تجميعها بواسطة فتحات مثل S_2 . تتحرك الأيونات بسرعة مقدارها v عندما تغادر S_2 ثم يتم حرفها لتأخذ مسارًا دائريًا بواسطة المجال المغناطيسى كما هو مبين . ويمكن قياس نصف قطر المسار r وذلك بتحديد المواقع التى تصطدم فيها الأيونات بلوح فوتوغرافى أو كاشف من أى نوع آخر .

يرتبط نصف قطر الانحناء r بكتلة الأيون بالعلاقة الآتية : (راجع المعادلة 5–19) .

$$m = \frac{r^2 B^2 q}{2V} \qquad (19\text{–}5)$$



شكل 1-28:
يتم حرف الأيونات بواسطة مجال مغناطيسى فى مطياف الكتلة .



يتم فى هذا المصنع فى كندا تصنيع الماء الثقيل ، $(^2H)_2O$ (حيث الأبراج العالية) . ويستخدم الماء الثقيل فى بعض أنواع المفاعلات النووية . أما الماء الذى يرى فى مقدمة الصورة فهو ماء طبيعى ، تحتوى جزيئاته على نحو 1/100 بالمائة من النظير ^2H (الديوتيريوم) .

فإذا علمت قيم r ، B ، q و V لأمكن حساب كتلة الأيون ، ولكى نحصل على كتلة النواة فإننا نطرح كتلة الإلكترونات المصاحبة للأيون من m .

عندما استخدم مطياف الكتلة لقياس الكتلة النووية ، برزت ظاهرة مثيرة للاهتمام فكثيرًا ما شوهد أن للعنصر الواحد حزمتين أو أكثر من الأيونات فى مطياف الكتلة بمعنى أن الجسيمات التى تصل إلى الكاشف تتخذ نصفى قطر محددين تمامًا أو أكثر ؛ فإذا ضممنا هذا الاكتشاف مع المعادلة (5-19) لأمكننا استنتاج أن : **نوى العنصر الواحد قد يكون ذا كتل مختلفة** .

وسنعتبر المثال التالى على سبيل التوضيح ، فعند تحليل الكلور النقى كيميائيًا فى مطياف الكتلة ، اتضح أنه يتكون من نوعين من النوى :

النوع الأول : الكتلة = 34.97 u النسبة المئوية = 75.4

النوع الثانى: الكتلة = 36.97 u النسبة المئوية = 24.6

ويقال أن **الوفرة الطبيعية** للنوع الأول هى 76.4 بالمائة ، وأن الوفرة الطبيعية للنوع الثانى 24.6 بالمائة . ويسلك كلا النوعين نفس السلوك الكيميائى تمامًا ، ومعنى ذلك أن التركيب الإلكترونى لكل منهما مطابق للآخر ، ومن ثم فلابد أن شحنتيهما النوويتين

متساويتان ، وكل منهما تساوى العدد الذرى Z مضروبًا فى كم الشحنة e . ويسمى مثل هذا النوى ، الذى له نفس الشحنة وله كتل مختلفة **نظائر العنصر المذكور** .

للنوى المتناظر نفس عدد البروتونات ولكن عدد النيوترونات هو الذى يختلف .

ولكى نقسم النوى حسب الكتلة والشحنة وعدد النويات ، فإن العادة جرت على تمييز العنصر الذى رمزه X بالشكل ^A_ZX . فعلى سبيل المثال ، تمثل نظائر الكلور الذى تناولناه منذ قليل بالرمز $^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ و $^{37}_{17}\mathrm{Cl}$: حيث لكل من النظيرين نفس العدد الذرى ، $Z = 17$ ، ولكن أحدهما عدده الكتلى $A = 35$ أما الآخر فعدده الكتلى $A = 37$ ، ويشار إلى هذين النظيرين على أنهما الكلور 35 والكلور 37 . ولنتناول مثالاً آخر وهو $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ويطلق عليه يورانيوم 238 . الذى تحتوى نواته على شحنة مقدارها $+92e$ وبها 92 بروتونًا و $146 = 92 - 238$ نيوترونًا . أما اليورانيوم 235 ، $^{235}_{92}\mathrm{U}$ فبه نفس عدد البروتونات 92 و 143 نيوترونا فقط داخل النواة .

ولعلك معتاد على الجدول الدورى للعناصر الذى درسته فى الكيمياء ، حيث تجد **الكتل الذرية** مدونة عادة إلى جانب العناصر ، وتعرَّف على أنها متوسط كتل **النظائر** الموجودة فى الطبيعة . فمتوسط كتلتى نظيرى الكلور ، مثلاً ، هو

$$m_{av} = 35(0.754) + 37(0.246) = 35.5\ \mathrm{u}$$

وهى القيمة الواردة داخل الجدول الدورى الذى تجده فى الغلاف الداخلى الأخير للكتاب . كما يضم الملحق رقم 1 الكتل* الذرية لعدد كبير من النظائر . وعليك تذكر أن هذه هى كتل النوى ، **مضافا إليها كتل الإلكترونات الذرية** ، ومعبرًا عنها بوحدة الكتل الذرية المعرَّفة بدلالة كتلة ذرة الكربون $^{12}_{6}\mathrm{C}$:

وحدة الكتل الذرية الواحدة (u) هى بالضبط جزء من اثنى عشر جزءًا من كتلة ذرة كربون 12 واحدة ($^{12}_{6}\mathrm{C}$) .

وتنسب كل الكتل الأخرى إلى هذا المقياس العيارى . والقيمة الواردة فى القسم 1-28 مأخوذة من بيانات مطياف الكتلة .

مثال توضيحى 1-28

ما هو الكسر الذى تمثله الإلكترونات فى الكتلة الذرية للنظير $^{235}\mathrm{U}$؟

استدلال منطقى : نعلم من الملحق رقم 1 أن الكتلة الذرية للنظير $^{235}\mathrm{U}$ هى $235.04\ \mathrm{u}$ ؛ وحيث أن العدد الذرى لليورانيوم 92 ، فإن لهذه الذرة 92 إلكترونا ، فإذا كانت كتلة الإلكترون $9.11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$ أو $0.000549\ \mathrm{u}$ فإن :

$$\frac{92(0.000549)\ \mathrm{u}}{235\ \mathrm{u}} = 2.15 \times 10^{-4}$$

* لعلك تذكر من الفصل الحادى عشر أن مصطلحى **الوزن الذرى و الكتلة الذرية** يستعملان بنفس المعنى .

وهكذا - وفى كثير من الأغراض - يمكننا إهمال كتلة الإلكترونات. ■

28-3 الحجم والكثافة النوويان

يمكننا تقدير حجم النواة بكثير من الطرق . وإحدى هذه الطرق هى أن نقذف النواة بجسيمات مختلفة الأنواع مثلما فعل رذرفورد وننظر كيف تتشتت . وفى هذا الصدد لابد من استعمال جسيمات ذات طاقات عالية جدًا حتى تتغلب على تنافر كولوم مع النواة لو كانت الجسيمات هى بروتونات أو جسيمات ألفا وتثبت مثل هذه التجارب أن النواة لا يمكن اعتبارها كرة بسيطة مصمتة ذات تركيب منتظم .

وعلى الرغم من حقيقة أنه ليس للنواة نصف قطر محدد بشكل حاسم فيما يتعلق بشحنتها أو كتلتها ، إلا أن حوافها محددة بما يكفى لإعطائها نصف قطر تقريبى ذا معنى . وكما قد تتوقع فإن قذف النواة بجسيمات مشحونة يؤدى إلى قياس أولى لتوزيع الشحنة بالنواة ، فى حين أن قذفها بالنيوترونات يقيس توزيع الكتلة بشكل أولى . . كما تستخدم طرق أخرى لقياس نصف قطر النواة وهى تتفق فيما بينها تقريبًا ، على أن نصف قطر النواة R بالنسبة للعناصر المختلفة يعطى بالعلاقة :

$$R \approx (1.2 \times 10^{-15}\ \text{m})(A^{1/3}) \qquad (28\text{–}1)$$

حيث A هو عدد الكتلة للذرة المعنية .

ويلاحظ من المعادلة (1–28) أن نصف قطر النواة النموذجية هو من الرتبة 10^{-15} m . ولذلك فقد اصطلح على قياس الأطوال النووية بوحدة الفمتومتر (fm) ، حيث $1\ \text{fm} = 10^{-15}\ \text{m}$. وقد كانت هذه الوحدة فى الأصل فرمى ***fermi*** تخليدًا لاسم عالم الفيزياء النووية الشهير أنريكوفيرمى ؛ ثم أصبح من المعتاد استخدام التسميتين : فيرمى أو فمتومتر لتعنيا نفس الشىء .

إن تغير نصف القطر النووى مع $A^{1/3}$. يهيئ الحصول على معلومات مهمة حول كيفية تعبئة عدد A من النويات معًا داخل النواة . إذ لو حسبنا حجم النواة لوجدنا :

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(1.2\ \text{fm})^3(A) = (7.2 \times 10^{-45}\ \text{m}^3)(A)$$

والآن لنتدبر معنى هذه الكمية . . إذ لو أن المقدار $7.2 \times 10^{-45}\ \text{m}^3$. قد اعتبر كحجم نوية واحدة ، لكان الحجم V هو ببساطة مجموع الحجوم المنفردة لعدد A نوية . ونتيجة لذلك ، فإن جميع النوى الكبير ستكون كثافته واحدة تقريبًا كما سنرى فى المثال التوضيحى التالى :

مثال توضيحى 2–28

احسب كثافة نواة الذهب ρ .

استدلال منطقى : لو أهملنا كتلة الإلكترونات الذرية لوجدنا أن كتلة نواة الذهب

تساوى كتلته الذرية كما تندرج فى الملحق رقم 1 وهى 197 u . وحجم النواة هو

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = (7.2 \times 10^{-45}\ \text{m}^3)(A)$$

وحيث أن $A = 197$ وكتلة ذرة الذهب = 197 u ، فإن

$$\rho = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}} = \frac{(197\ \text{u})(1.66\times10^{-27}\ \text{kg/u})}{(7.2\times10^{-45}\ \text{m}^3)(197)} \approx 2.3 \times 10^{17}\ \text{kg/m}^3$$

يلاحظ أنه لكون عدد الكتلة ($A = 197$) مساويًا تقريبًا للكتلة الذرية (197 u) فإن العدد (197) يتلاشى من البسط والمقام وتصبح قيمة ρ هى الكثافة التقريبية لجميع النوى . ولا يمكن أبدًا التعامل مع مثل هذه الكثافة الهائلة على نطاق واسع على ظهر الأرض ، وإنما فى باطن بعض النجوم (النجوم النيوترونية) قد توجد مثل هذه الكثافات الضخمة . ففى تلك النجوم ، تنسحق القشرات الإلكترونية بواسطة قوى التثاقل الهائلة عند مركز النجم . ■

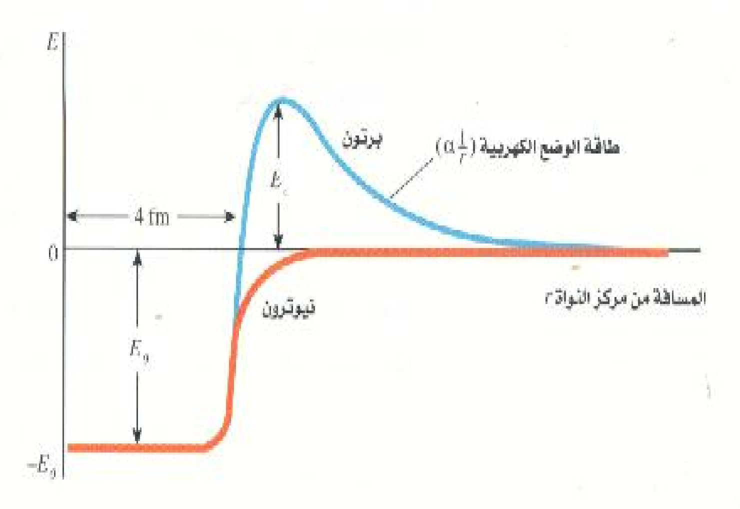
28-4 طاقة الربط النووية

نعلم جميعًا أن الشحنات المتشابهة تتنافر مع بعضها البعض ، وعلى ذلك فقد كان من الضرورى أن تميل القوى الكهروستاتيكية بين البروتونات داخل النواة إلى جعلها تنفجر . وقوى التجاذب التثاقلية بين النويات أصغر بعدد كبير من الرتب فى المقدار من أن تعادل قوى التنافر هذه . ولذلك لزم أن تكون هناك قوة ثالثة بين النويات لكى تجعلها تتجاذب معًا حتى تتماسك النواة . وهذه هى **قوة الربط النووية** التى كثيرًا ما تسمى ببساطة **القوة النووية** أو **القوة الشديدة** .

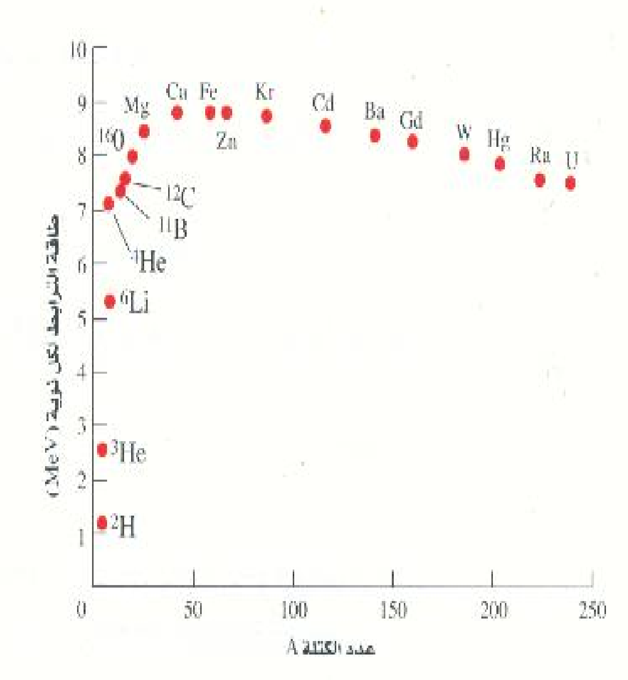
تختلف القوة النووية عن كل من القوى الكهروستاتيكية وقوى التثاقل فى أنها لا تتبع قانون التربيع العكسى ، وبدلاً من ذلك فإن مداها محدود ، وقد بينت التجارب أن هذه القوة تتضاءل لتصل إلى الصفر عندما تصل المسافة إلى ما يزيد عن 5×10^{-15} m وبعبارة أخرى عند مسافات تصل إلى نحو ضعف قطر النوية . أما إذا قلت المسافة عن هذا ولو بمقدار طفيف ، فإن القوة النووية تتعاظم لتطغى على قوى التنافر بين أى بروتونين وتقوم بربطهما معًا . وإذا أخذنا تقريبًا أوليًا ، فإن القوة النووية بين البروتونين هى نفسها التى تكون بين نيوترونين أو بين بروتون ونيوترون . إلا أن هذه القوى النووية لا تأثير لها على الإطلاق ، على الإلكترونات . وهذه نقطة مهمة علينا تذكرها عند معالجة التغيرات التى تطرأ على النوية وتؤدى إلى ظهور إلكترونات داخل النواة .

دعنا الآن ننظر فى ما يحدث لطاقة مجموعة من النويات المتباعدة عن بعضها البعض عندما تجتمع معًا فى تركيب نووى . يمكننا اعتبار طاقة تفاعل هذه النويات صفرًا عندما تكون متباعدة عن بعضها البعض ، وحينئذ تكون الطاقة الكلية للمجموعة هى مجموع طاقات كتل السكون لها . فإذا ما اقتربت النويات من بعضها البعض ، فإن

البروتونات ستعانى من تزايد التنافر بسبب قوى كولوم ، أما النيوترونات فلن يعنيها هذا فى شىء ، ولن تعانى من أية قوة ، فإذا صارت المسافة نحو 2 fm ، فإن كلاً من البروتونات والنيوترونات ستبدأ فى الإحساس بقوة الربط النووية الشديدة التى تطغى على تنافر كولوم ، ونتيجة لذلك تتقارب البروتونات والنيوترونات حتى تكون نواة . وبالنسبة لنواة ما فإن كل بروتون وكل نيوترون يكون مربوطاً داخل النواة بنفس طاقة الربط وهى $-E_0$. (ما سبب كون طاقة الربط ذات إشارة سالبة ؟) . ويلخص الشكل 28-2 شكل طاقات البروتون والنيوترون عند مسافات مختلفة من النواة (طاقات كتلة السكون المتفردة ليست مذكورة) ونستنتج من هذا أن :



شكل 28-2:
منحنيات طاقة وضع نيوترون وبرتون داخل نواة مستقرة . والقيم النموذجية يمكن أن تكون $E_c = 8$ MeV ، $E_0 = 50$ MeV .



شكل 28-3:
طاقة الربط لكل نوية فى حالة بعض نماذج العناصر .

طاقة النواة المستقرة أقل من مجموع طاقات كتل السكون للنويات المنفردة التى تكوّن النواة .

تختلف قيمة E_0 من تركيب نووى لآخر كما هو مبين فى الشكل 28-3 . وخلافاً لطاقة ربط الإلكترونات الذرية التى لا تعدو بضع وحدات من الإلكترون فولت فإن النويات ترتبط داخل النواة بطاقات أكبر من ذلك بملايين المرات كما يظهر فى الشكل . كما

يلاحظ أن E_0 تصل إلى قيمتها العظمى للعناصر المحيطة بالحديد $(Z = 26)$ وتكون أصغر من ذلك بالنسبة للنوى الذى قيم عدده الذرى أكبر من ذلك أو أصغر . أى أن الشكل 3-28 قد يفسر على أنه يقدم مؤشرًا على الاستقرار النووى .

وحيث أنه طبقًا لنظرية النسبية ، ترتبط التغيرات فى الطاقة بتغيرات فى الكتلة ، فإن علينا أن نتوقع أن النواة المكتملة ستكون ذات كتلة أصغر من كتلة مجموع كتل السكون للنويات المنفردة بداخلها . ويعرف الفرق فى الكتلة هذا **بالنقص الكتلى** للنواة ويمكن كتابته على الصورة :

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{nuc}}$$

حيث m_p و m_n هما كتلتا بروتون ونيوترون حرين ، أما M_{nuc} فهى الكتلة الحقيقية للنواة المكتملة . وتنص نظرية النسبية على أن النقص الكتلى مرتبط بطاقة الربط الكلية للنواة :

$$\text{طاقة الربط الكلية} = \Delta mc^2$$

وتعتبر الحقيقة الكامنة فى أن الكتل المقاسة وطاقات الربط بالنوى تتفق مع هذا النص دليلاً مباشرًا على صحة نظرية النسبية . وسوف نعود لمعالجة هذا الأمر فيما بعد عند تناول طرق توليد الطاقة من النوى .

مثال توضيحى 3-28

ما مقدار الطاقة اللازمة لتغيير كتلة نظام ما بما قيمته 1 u ؟

استدلال منطقى : سنطبق معادلة الكتلة ـ الطاقة لأينشتين $\Delta E = \Delta mc^2$. وفى حالتنا هذه : $\Delta m = 1\ \text{u} = 1.6606 \times 10^{-27}\ \text{kg}$

$$\Delta E = 1.492 \times 10^{-10}\ \text{J} = 931.5\ \text{MeV}$$

ومن المناسب تذكر هذه الحقيقة : **إن وحدة كتل ذرية واحدة مكافئة لطاقة مقدارها 931.5 MeV .** ■

مثال 1-28

يمكننا أن نجد قيمة الكتلة الذرية للهليوم ^4_2He من اللحق رقم 2 وهى تساوى 4.002604 u . احسب طاقة الربط الكلية لنواته ، ومتوسط طاقة الربط لكل نوية .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى المعلومات التى أحصل عليها من طاقة الربط ؟

الإجابة : نحصل على الفرق بين الكتلة الكلية للنويات عندما تكون منفصلة وكتلتها عندما ترتبط معا لتكوّن نواة . وحاصل ضرب النقص الكتلى هذا فى مربع سرعة الضوء (c^2)

يساوى طاقة الربط الكلية . أو ـ كما وجدنا منذ قليل ـ فإن كل كتلة مقدارها u مكافئة لطاقة مقدارها 931.5 MeV .

سؤال : ما هى الكتلة الكلية للنويات المنفصلة ؟

الإجابة : لكل بروتون منفصل كتلة مقدارها 1.007276 u ولكل نيوترون منفصل كتلة مقدارها 1.008665 u . ومن ثمَّ تكون الكتلة الكلية للنويات الأربع عندما تكون منفصلة هى

$$m_{tot} = 2(1.008665 \text{ u}) + 2(1.007276 \text{ u}) = 4.031882 \text{ u}$$

سؤال : ما هى كتلة نواة ^4_2He المجردة ؟

الإجابة : إنها الكتلة الذرية المعطاة مطروحًا منها كتلة الإلكترونين ، ويمكننا إهمال المكافئ الكتلى المناظر لبعض وحدات من الإلكترون فولت والتى تمثل طاقة ربط الإلكترونات .

الحل والمناقشة : إن الكتلة النووية للهليوم ^4He هى

$$4.002604 \text{ u} - 2(0.000549 \text{ u}) = 4.001506 \text{ u}$$

أى أن النقص الكتلى يكون :

$$\Delta m = 4.031882 \text{ u} - 4.001506 \text{ u} = 0.030376 \text{ u}$$

أما طاقة الربط الكلية فهى :

$$\text{طاقة الربط} = (0.030376 \text{ u})\ (931.5 \text{ MeV/u}) = 28.29 \text{ MeV}$$

وبالقسمة على 4 نجد أن :

$$\text{متوسط طاقة الربط لكل نوية} = \frac{28.29 \text{ MeV}}{4} = 7.073 \text{ MeV}$$

عليك مقارنة هذه النتيجة بالقيمة الواردة بالشكل 3-28 .

تمرين : تبلغ طاقة ربط الإلكترون فى ذرة الهيدروجين 13.6 eV . ما مقدار الكتلة ، بوحدات الكتل الذرية ، التى سوف تتولد عند تأين ذرة الهيدروجين ؟

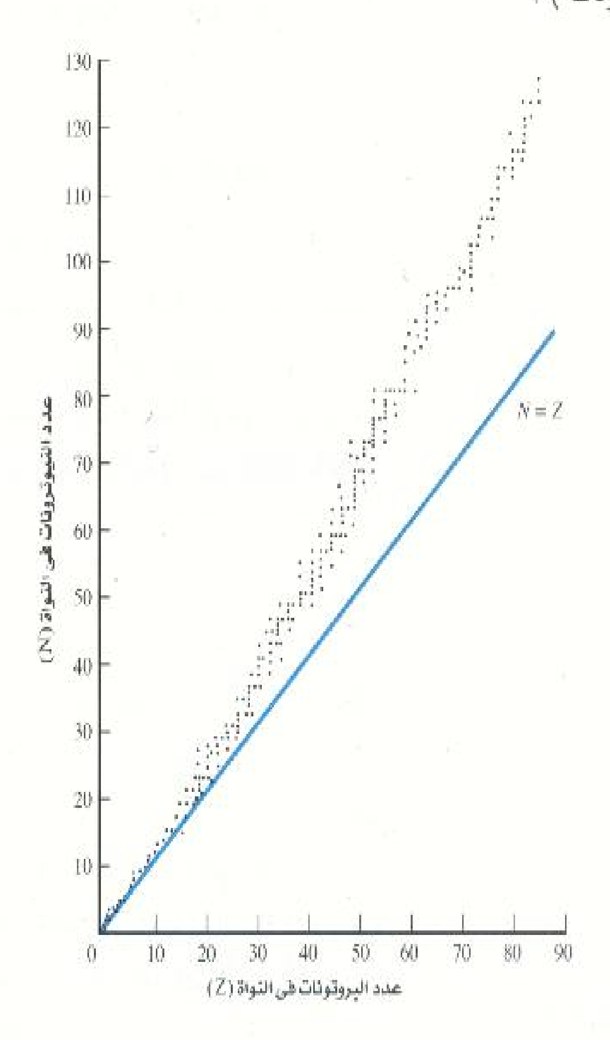
الإجابة : 1.46×10^{-8} . وهذه الكتلة من الصغر بحيث لا يمكن قياسها ، ولهذا فإن التفاعلات الكيميائية لا يمكن أن تتيح معلومات تتعلق بالتحول بين الكتلة والطاقة .

5-28 النشاط الإشعاعى

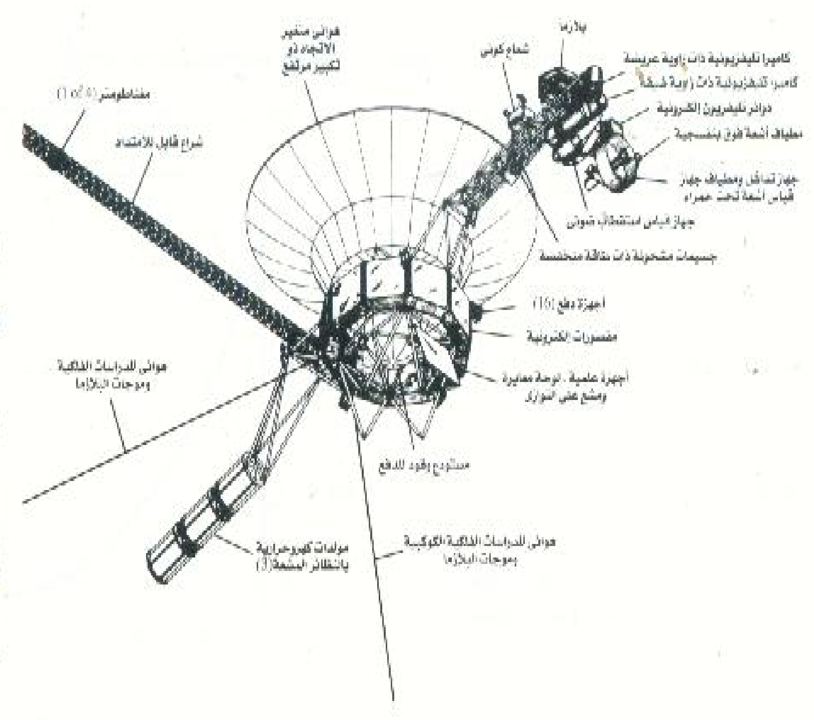
تتعرض النويات كما رأينا لقوتين متنافستين : قوة التجاذب النووية بين جميع النويات وقوة كولوم التنافرية بين البروتونات . وإذا كانت المجموعة تضم عددًا أكبر من اللازم من البروتونات بالنسبة لعدد النيوترونات ، فإن المجموعة ستتعرض لقوة تفجيرية كبيرة نتيجة التنافر الكولومى . أى أنها لن تكون قادرة على التواجد كوحدة مستقرة . وهناك عوامل أخرى أيضًا من شأنها التأثير على استقرار النواة كما سنرى لاحقًا . وليس هناك سوى عدد قليل من مجموعات البروتونات والنيوترونات التى تتمتع باستقرار نسبى ويوضحها الشكل 4-28 .

ولن يكون النوى الكبير مستقرًا إلا إذا كان يحتوى على نيوترونات أكثر من البروتونات كما هو واضح من الشكل 4-28 . أى أن فائض النيوترونات ضرورى من أجل « تخفيف » الشحنة الموجبة للبروتونات ، ومن ثم خفض التأثير التنافرى لقوى كولوم . وعلى الرغم من أن معظم النوى المشار إليه فى الشكل 4-28 مستقر تمامًا ، إلا أن تلك النوى التى يزيد فيها Z عن 83 ستكون غير مستقرة نوعًا ما .

يستطيع النوى غير المستقر أن يعانى تلقائيًا من تغير داخلى نحو حالة ذات طاقة أقل واستقرار أكبر . ويتم هذا بالتخلص من الطاقة الزائدة عن طريق طرد جسيمات وإشعاع كهرومغناطيسى أثناء عملية يطلق عليها **النشاط الإشعاعى** وقد اكتشف الباحثون الأوائل فى النشاط الإشعاعى (فى تسعينيات القرن التاسع عشر) الطاقة المنبعثة ، واستطاعوا باستخدام المجالات المغناطيسية إثبات وجود ثلاثة أنواع محددة من الطاقة : ذات الشحنة الموجبة ، وذات الشحنة السالبة والمتعادلة كهربيًا ؛ أما فيما عدا ذلك فقد كان الباحثون عاجزين عن تحديد هوية الإشعاعات ولذا أطلقوا عليها أشعة ألفا (α) وبيتا (β) وجاما (γ) (وهى الحروف الإغريقية المناظرة للحروف a ، b ، c) وقد صرنا نعرف حاليًا أن جسيمات α هى نوى ^{4}He وأن جسيمات β إلكترونات ، أما أشعة γ فهى موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجى فى غاية القصر (أو فوتونات) .



شكل 4-28:
تمثل كل نقطة نواة إما مستقرة تمامًا أو بالتقريب ، أما الخط المتصل فيمثل مواقع النوى الذى به عدد متساو من البروتونات والنيوترونات .



تستخدم الطاقة المنطلقة أثناء الاضمحلال الإشعاعى فى توليد القدرة الكهربية اللازمة لتشغيل سفينة فضائية مثل « فويجر » المبينة بالشكل والنظير المستخدم هو البلوتونيوم ^{238}Pu الذى يبلغ عمر النصف له 89 سنة ومولدات النظائر المشعة الحرارية (RTG) مصممة بحيث تنتج 160 W من القدرة الكهربية وبجهد مقداره 30 V من التيار المستمر عند بدء الرحلة . هل يمكنك تقدير مدى الانخفاض فى القدرة الناتجة من المولد بعد مرور عشر سنوات من تشغيله فى رحلة سفينة الفضاء ؟

يعتقد العلماء أن النويات فى حالة حركة دائمة ، وأنها مشتركة فى محاولات دائبة للهروب من النواة ، ولكنها لا تنجح أبدًا فى الهروب من النوى المستقر . أما النواة غير المستقرة فإنها تستطيع خفض طاقتها وتصبح أكثر استقرارًا إذا أطلقت جسيمًا و / أو طاقة . وهى تفعل ذلك على أساس عشوائى تمامًا . ويمكننا تصور جسيمًا يحاول الهروب من النواة ، باذلاً العديد من المحاولات كل ثانية ، وفى لحظة مواتية ، تكون النواة فيها ذات تركيب داخلى يسمح للجسيم بالهروب ، نقول أن النواة قد قامت **بانحلال إشعاعى** .

وتعنى هذه اللعبة المستمرة للصدف داخل جميع النوى غير المستقر أن لكل نواة فرصة فى أن تنحل فى فترة زمنية Δt . دعنا الآن نتفق على أن الفرصة أو الاحتمال فى أن نواة ما ستنحل فى فترة زمنية Δt ، هو $\lambda\Delta t$ ، حيث سنطلق على λ **ثابت التفتت أو ثابت الاضمحلال** (يجب عدم الخلط بين هذا الرمز ورمز الطول الموجى) . فإذا كان لدينا عينة من مادة بها N نواة من هذا فإن العدد الذى سيضمحل فى فترة زمنية مقدارها Δt هو $N\lambda\Delta t$. ونستطيع من ثم أن نكتب :

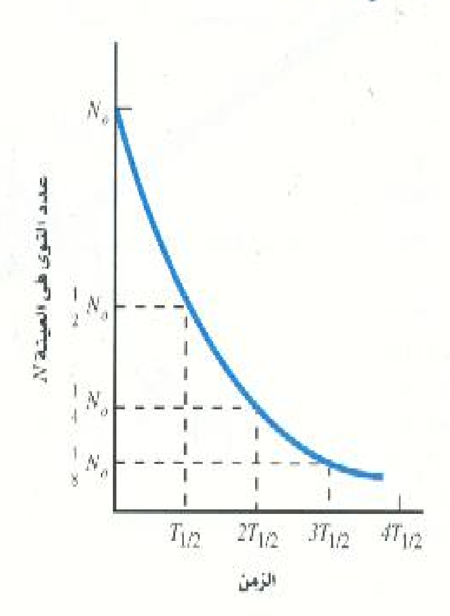
$$\Delta N = -N\lambda\Delta t \qquad (28\text{–}2)$$

وتشير الإشارة السالبة إلى أن المقدار ΔN سالب ، حيث أن N فى تناقص وسنطلق على المقدار $\Delta N/N$ **فاعلية العينة** ، وهى عدد الاضمحلالات التى تحدث فى وحدة الزمن ، وسوف نتناوله فيما بعد فى القسم 28-12 .

هب أن لدينا N_0 ذرة مشعة عند اللحظة $t = 0$. وسنقوم باستخدام المعادلة (28-2) لبيان كيفية تغير عدد الذرات التى لم تضمحل (N) مع الزمن ، والنتيجة مبينة فى الشكل 28-5 . ويطلق على هذا النوع من المنحنيات **منحنى الاضمحلال الأُسِّى** وسنعرض معادلة هذا المنحنى فى القسم التالى .

ويمكن إعطاء الاضمحلال الأُسّى الوصف البديل البسيط التالى :

تنخفض كمية المادة التى تقوم بالاضمحلال الأُسّى بمقدار النصف فى فترات زمنية متتالية ومتساوية ، تسمى كل منها **عمر النصف** لتلك المادة .



شكل 5–28:
يضمحل العنصر المشع أسيًا .

ويوضح الشكل 5–28 عمر النصف $T_{1/2}$. يلاحظ أنه فى كل نصف عمر متسلسل ينخفض عدد النوى المتبقى إلى النصف ، ومعنى هذا أنه بعد انقضاء عدد n من أعمار النصف فإن عدد النوى الذى تبقى ولم ينحل هو $(\frac{1}{2})^n N_0$.

تتباين أعمار النصف فى المواد المشعة تباينًا كبيرًا ، فعمر النصف لليورانيوم 238 يصل إلى 4.47 بليون سنة ، بينما يصل فى حالة الراديوم 226 إلى 1600 سنة أما غاز الرادون وهو العنصر الذى يصير إليه الراديوم عند اضمحلاله ، فيصل عمر النصف له إلى 3.8 يوم فحسب . كما أن الكثير من المواد المشعة التى تنتج صناعيًا لا يصل عمر النصف لديها إلا إلى كسر من الثانية . وعلى الرغم من أى شىء فكل هذه العناصر تضمحل طبقًا لنفس قانون الاضمحلال الأسى .

ومن الأهمية بمكان أن ندرك أن عمر النصف سلوك **إحصائى** لعدد ضخم من النوى ، ولذلك لا توجد طريقة للتنبؤ بالوقت الذى تضمحل فيه نواة بعينها . وقد تستغرق نواة راديوم منفردة ـ مثلاً ـ مليون سنة لتتحول إلى نواة أخرى بالاضمحلال بينما لا تستغرق نواة أخرى سوى ساعة واحدة ، على أنه فى حالة عينة ضخمة إحصائيًا (أى كمية ملموسة من عنصر ما تحتوى على تريليونات فوق تريليونات من النوى) يقوم نصف الراديوم بالاضمحلال إشعاعيًا فى 1600 سنة .

لقد أصبحت لدينا الآن طريقتان لوصف معدل الاضمحلال : λ أو $T_{1/2}$ ومن الطبيعى أن ترتبط هاتان الكميتان بشكل أو بأخر . وإذا لجأنا إلى حساب التفاضل والتكامل ، لأمكننا إثبات أن :

$$\lambda T_{1/2} = 0.693 = \ln 2 \qquad (28\text{–}3)$$

وستأتى فرص كثيرة تحتاج فيها لاستعمال هذه المعادلة .

مثال توضيحي 4-28

تتم صناعة اليود 131 وهو نظير مشع فى المفاعلات النووية لكى يستخدم فى الطب إذ إنه حين يتم تناوله داخل الجسم ، يتجه نحو الغدة الدرقية ليتركز فيها ؛ حيث يصبح مصدرًا للإشعاع الذى يعالج مرض **زيادة نشاط الغدة الدرقية** . وعمر النصف لهذا النظير هو 8 أيام . هب أن أحد المستشفيات قد طلب كمية مقدارها 20 mg من ^{131}I وقام بتخزينها لمدة 48 يومًا . كم يتبقى من النظير ^{131}I الأصلى بعد هذه المدة (48) (يومًا) ؟

استدلال منطقى : يضمحل اليود إلى النصف كلما مرت 8 أيام ، ونستطيع من ثم وضع الجدول التالى :

الوقت (يوم)	0	8	16	24	32	40	48
اليود (mg)	20	10	5	2.5	1.25	0.625	0.313

أى أنه بعد انقضاء 48 يومًا لا يتبقى من 20 mg الأصلية سوى 0.313 mg . ■

مثال 2-28

وضع 1 g من ^{60}Co فى قنينة صغيرة ، فإذا كان عمر النصف لهذا النظير 5.25 سنة فما هى فاعلية العينة (أ) فى البداية و (ب) بعد تخزين القنينة لمدة 21 سنة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة الفاعلية ؟

الإجابة : لدينا من العادلة (2-28) $\Delta N/\Delta t = -\lambda N$. و N هنا هى مقدار المادة الموجودة عند اللحظة التى يتم فيها حساب الفاعلية ، λ وهو ثابت اضمحلال المادة . وتشير الإشارة السالبة إلى أن عدد نوى النظير ^{60}Co ، N يتناقص .

سؤال : ما هى العلاقة التى تربط بين ثابت الاضمحلال وعمر النصف ؟

الإجابة : بالرجوع إلى المعادلة 3-28 ، نجد أن $\lambda = 0.693\ T_{1/2}$. وعادة ما نعبر عن الفاعلية بعدد الاضمحلالات فى الثانية ، ولذا يجب التعبير عن $T_{1/2}$ بالثوانى .

سؤال : كيف تفيدنا الكتلة فى معرفة القيمة الابتدائية للعدد N ؟

الإجابة : لعلك تذكر أن 1 mol (عدد أفوجادرو N_A)من أية مادة ، فى كتلة من المادة (بالجرام) تساوى عدديًا كتلتها الذرية . ويمكنك اعتبار الكتل الذرية للنظير ^{60}Co مساوية لعدد الكتلة A وهو يساوى 60 ، إلى ثلاثة أرقام معنوية ولهذا فإن 1 g من ^{60}Co سيكون به $(1/60)N_A$ نواة .

سؤال : بالنسبة للجزء (ب) ، ما الذى يحدد عدد نوى ^{60}Co المتبقى بعد مرور 21 سنة ؟

الإجابة : لاحظ أن 21 سنة تمثل 4 أعمار نصف ، ولذلك تكون N على مدى 21 سنة هى $\frac{1}{16} = (\frac{1}{2})^4$ من القيمة الأصلية .

الحل والمناقشة : فى البداية كان $N = (\frac{1}{60})(6.023 \times 10^{23}) = 1.00 \times 10^{22}$ نواة

وتكون الفاعلية هى (ضع $5.25\ yr = 1.66 \times 10^{8}\ s$) .

$$\left|\frac{\Delta N}{\Delta t}\right| = \frac{0.693}{1.66 \times 10^{8}\ s}(1.00 \times 10^{22})$$

$$= 4.19 \times 10^{13}\ decay/s$$

أى أنه يتبقى بعد 21 سنة $(\frac{1}{16})(1.00 \times 10^{22}) = 6.25 \times 10^{20}$ نواة . وعلى هذا تكون فاعلية العينة بعد 21 سنة هى ببساطة $\frac{1}{16}$ من الفاعلية الأصلية ، أو 2.62×10^{12} اضمحلالا فى الثانية . يلاحظ أن ثابت الاضمحلال (وعمر النصف) بمثابة كميات مميزة لاضمحلال ^{60}Co بغض النظر عن مقدار N .

28-6 الاضمحلال الأسّى

منحنى الاضمحلال الأسى الوارد فى الشكل 5-28 ، معروف جيدًا فى العلم . وكما شاهدنا فى القسم السابق ، فإن ارتفاعه ينخفض بمقدار النصف كل فترة عمر النصف المثلة على المحور الأفقى . ويمكن تمثيل المنحنى فى صورة رياضية على النحو التالى :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (28\text{-}4)$$

حيث λ هو ثابت الاضمحلال ، والدالة $e^{-\lambda t}$ هى **الدالة الأسّية** ، أما e فهى قاعدة اللوغاريتم الطبيعى وتساوى 2.7183 .

واستعمال المعادلة 4-28 قد أصبح ميسورًا جدًا حاليا ، لأن معظم الآلات الحاسبة اليدوية بها زر (مفتاح) لهذه الدالة ؛ أما إذا لم تكن لديك آلة حاسبة بها هذه الإمكانية فيمكنك استخراج الدالة من جدول الدوال الأسية الموجود فى معظم المراجع .

مثال توضيحى 5-28

عمر النصف لليورانيوم 238 هو $4.5 \times 10^{9}\ yr$ ، ويعتقد أن الكرة الأرضية قد نشأت (صار بها أرض صلبة) منذ نحو $4.0 \times 10^{9}\ yr$. ما هو كسر اليورانيوم الذى كان موجودًا عند تكون الأرض وبقى دون اضمحلال إلى الآن ؟

استدلال منطقى : سنطبق قانون الاضمحلال بالمعادلة (4-28) :

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{4.5 \times 10^{9}\ yr} = 1.54 \times 10^{-10}\ yr^{-1}$$

ومنها نجد أن :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} = e^{-(1.54 \times 10^{-10}\ yr^{-1})(4 \times 10^{9}\ yr)}$$

$$= e^{-0.616} = 0.54$$

ومعنى ذلك أنه يوجد حاليًا 54 بالمائة من اليورانيوم 238 . ■

مثال 28-3

تبقى تسعون بالمائة (90%) من عينة من مادة مشعة بعد مرور 12.0 h . ما هما ثابت الاضمحلال وعمر النصف لهذه المادة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو مغزى هذه النسبة 90% ؟

الإجابة : هى النسبة بين العدد المتبقى من النوى إلى العدد الأصلى N_0 . وبعبارة أخرى هى قيمة N/N_0 عندما $t = 12\ h$.

سؤال : ما هى العلاقة الرياضية بين N/N_0 و t ؟

الإجابة : إنها المعادلة (4–28) : $N/N_0 = e^{-\lambda t}$.

سؤال : كيف أستطيع إيجاد مقدار مجهول موجود فى الأس ؟

الإجابة : لعلك تذكر الخاصية العامة التالية للوغاريتمات : $\log_a a^x = x$. ولذلك فإن :

$$\ln (N/N_0) = \ln e^{-\lambda t} = -\lambda t$$

ويمكن حلها جبريًا لإيجاد λ .

الحل والمناقشة : باستخدام الآلة الحاسبة نجد أن :

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = \ln 0.90 = -0.105$$

يلاحظ أن اللوغاريتم الطبيعى لأى كسر يكون دائمًا سالبًا . وعندما نتقدم فى الحل ستجد أن هذه الإشارة هى التى تجعل قيمة λ موجبة . والآن ، يمكننا إيجاد λ من :

$$-\lambda\,(12\ h) = -0.105 \qquad \lambda = 8.75\times10^{-3}/h = 2.43\times10^{-6}/s$$

ويكون عمر النصف هو

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{8.75\times10^{-3}/h} = 79.2\ h$$

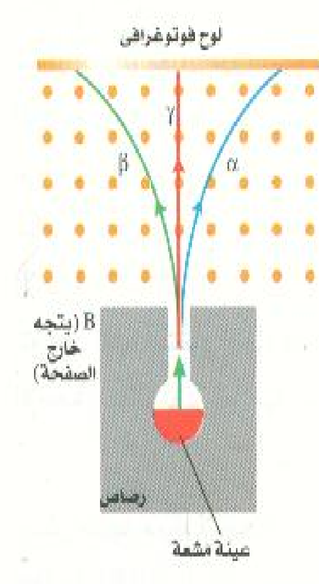
تمرين : ما هما ثابت الاضمحلال وعمر النصف إذا كان 20% يضمحل فى 40 s ؟

الإجابة : $0.00558\ s^{-1}$ ، 124 s .

28–7 الانبعاثات من النوى ذى النشاط الإشعاعى الطبيعى

كل النوى ـ كما ذكرنا سلفًا ـ الذى عدده الذرى أكبر من 83 ذو نشاط إشعاعى . وقد لجأ الباحثون الأوائل إلى تجربة كالمرسومة فى الشكل 6–28 لفحص الإشعاع الصادر من مواد ذات نشاط إشعاعى طبيعى . لقد وضعوا عينة صغيرة داخل مركز كتلة من الرصاص بعد أن صنعوا ثقبًا تنفذ منه الإشعاعات المنبعثة من العينة على هيئة حزمة موجهة . وعندما يسمح للحزمة بالمرور فى منطقة بها مجال مغناطيسى مستعرض ، فإنها تنشق

إلى ثلاث مركبات) كما هو موضح بالشكل . ونستطيع أن نستنتج من الاتجاهات التى تنحرف إليها الأشعة أن إحدى المركبات لا شحنة لها ، وأن إحداها موجبة الشحنة ؛ أما الثالثة فسالبة الشحنة . وكما ذكرنا من قبل فإن هذه الإشعاعات أعطيت الأسماء : أشعة ألفا (α) وأشعة بيتا (β) وأشعة جاما (γ) ، نظرا لأنها لم تكن محددة فى الأصل . وسنعالج كلاً منها فى دوره .



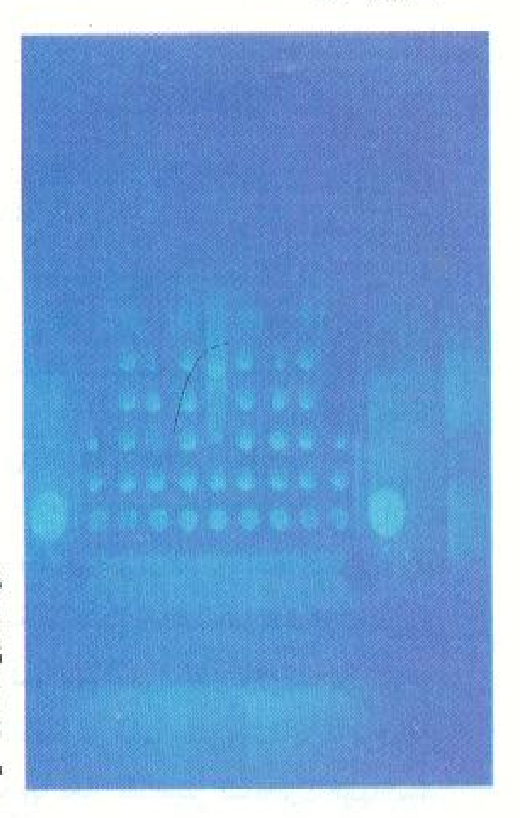
شكل 6–28:
ينفصل الإشعاع المنبعث من عينة مشعة إلى مركبات ثلاث بواسطة مجال مغناطيسى .

إشعاع جاما

يحدث أحيانًا أن تجد النواة نفسها فى حالة مستثارة من حيث الطاقة ، ولكى تعود إلى الحالة الأرضية فإنها تشع أشعة جاما ذات طاقة عالية . ولو أن النواة قامت بالانتقال من حالة ذات طاقة E_2 إلى حالة ذات طاقة E_1 فإن فوتون أشعة جاما الذى تطلقه تلك النواة ، سيكون تردده

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

وهذه العملية شبيهة بإطلاق فوتون ذرة ما عندما يتعدل تركيبها الإلكترونى لتتخذ حالة طاقة أدنى . وفوتونات جاما مثل فوتونات أشعة إكس من حيث الأساس على الرغم من أن الكثير من الانتقالات النووية ذات طاقات أكبر بكثير من الانتقالات الإلكترونية ولذلك فالفوتونات المنطلقة منها ذات أطوال موجية أقصر من الأطوال الموجية لأشعة إكس الناتجة من انتقالات الإلكترونات فيما بين القشرات الذرية . وعلى أية حال فاصطلاح شعاع جاما يطلق على الفوتون الذى تطلقه النواة بينما يطلق على فوتون مماثل شعاع إكس إذا كان منطلقًا خلال انتقال إلكترونى ذرى .



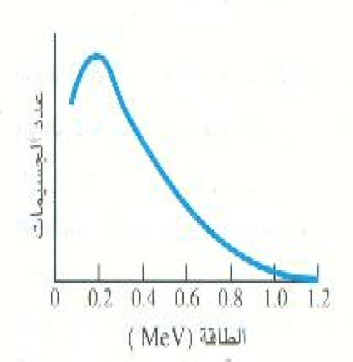
يسمى الضوء الأزرق الصادر من قلب مفاعل انشطارى – فى هذه الصورة – إشعاع تشيرينكوف . وهو ناتج عن دخول النيوترونات السريعة للغاية الناتجة من الانشطار إلى الماء ، وتكون سرعتها أكبر من سرعة الضوء فى الماء .

انبعاث جسيمات بيتا

يطلق الكثير من النوى المشع جسيمات بيتا (β) التى هى ـ ببساطة ـ إلكترونات . والعمليات التى تحدث داخل النواة عند حدوث انبعاث لجسيم β معقدة جدًا والنواة ليس بها إلكترونات ، ولذلك فإن العملية لابد أن تنطوى فعليًا على تحول نيوترون إلى بروتون وإلكترون . وتحتفظ النواة بالبروتون بينما ينبعث الإلكترون ويمكننا تمثيل انبعاث جسيم بيتا من نواة رمزها $^A_Z X$ كالتالى :

$$^A_Z X \rightarrow {}_{Z+1}^{\;\;A}Y + {}_{-1}^{\;0}e + {}_0^0\bar{v}$$

حيث يرمز $^0_{-1}e$ إلى جسيم بيتا المنبعث (الإلكترون) ، يمثل $_{Z+1}^{\;\;A}Y$ النواة المتحولة ، أما $^0_0\bar{v}$ فيمثل نيوترينو ، وهو جسيم سنتناوله بتفصيل أكبر بعد قليل . وتحتوى النواة المتحولة على بروتون إضافى أكثر من الذى لدى النواة الأصلية ، ولذلك يصير عددها الذرى $Z + 1$ ، أما عدد الكتلة فيظل كما هو A لأن عدد النويات ظل كما هو داخل النواة ، كما أن عدد الكتلة لجسيم بيتا سيعتبر صفرًا نظرًا لضآلة كتلته .



شكل 7–28:
توزيع طاقة جسيمات β المنبعثة من $^{210}_{83}$Bi

خلافًا لما يحدث فى حالة انبعاث أشعة جاما ، حيث تنطلق الأشعة حاملة طاقة محددة تناظر فروق الطاقة بين حالات الطاقة للنواة ، فإن جسيمات β تنبعث بطاقات متباينة فى مدى عريض من قيم الطاقة . ويوضح الشكل 7–28 طيف طاقة جسيم بيتا نموذجيًا . على أن هذا ليس هو ما نتوقعه ، لأنه إذا انبعث جسيم β فمن المنطقى أن يحمل معه مقدارًا من الطاقة ـ قابل للاستعادة ـ ويناظر فرق الطاقة بين حالتى النواة الابتدائية والنهائية . ومن الحقائق المحيرة الأخرى حول انبعاث جسيم β هو أن كمية تحرك الإلكترون المنطلق ليست مساوية ومضادة فى الاتجاه لكمية تحرك ارتداد النواة . ولكى نجد تفسيرًا لهذا ، فقد تم افتراض أن جسيمًا ثانيًا غير مكتشف ، ينبعث سويًا مع جسيم بيتا ، وعلى هذا الجسيم أن تكون كتلة سكونه * صفرًا وشحنته صفرًا وقد منح هذا الجسيم الاسم **نيوترينو** . وقد تم التوصل إلى دليل معملى مباشر على وجود هذا الجسيم بالفعل فى منتصف خمسينيات القرن العشرين .

انبعاث جسيمات ألفا

تنبعث من بعض النوى المشع جسيمات ألفا (α) ، وهى ببسطة نوى هليوم (بروتونان ونيوترونان) ويمكن تمثيلها بالرمز $^4_2\alpha$ أو $^4_2$He . والاضمحلال عن طريق إشعاع جسيمات α يظهر بوضوح فى حالة نوى الراديوم :

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma$$

وعمر النصف لهذا الانحلال هو 1600 yr . ويطلق على النواة الأصلية (الراديوم فى هذه الحالة) **النواة الأم** ، ويطلق على النواة النهائية (غاز الرادون الخامل) **النواة الوليدة** .

* هناك جدل حول ما إذا كانت كتلة سكون النيوترينو صفرًا تمامًا . على أن كتلته ، إذا كان له كتلة ، ستكون أصغر من كتلة الإلكترون بعدة رتب .

يكون اضمحلال ألفا مصحوبًا عادة بانبعاث شعاع جاما ، وفى هذه الحالات تتكون النواة الوليدة فى حالة مستثارة ؛ تصل فيما بعد إلى الحالة الأرضية إذا أطلقت شعاع جاما . وتتيح أشعة جاما هذه معلومات حول مستويات الطاقة بالنواة الوليدة .

مثال توضيحى 6-28

يضمحل الرادون 222 إلى البولونيوم 218 وذلك بواسطة انبعاث α . أوجد الطاقة التقريبية لجسم α المنبعث . والقيم المؤكدة للكتل الذرية هى $^{222}Rn = 222.01753\ u$ ، $^{218}Po = 218.00893\ u$ ، $^{4}He = 4.00263\ u$.

استدلال منطقى : الفقد فى الكتلة فى هذا التفاعل هو

$$\text{الفقد فى الكتلة} = 0.00597\ u = 222.01753 - (218.00893 + 4.00263)$$

وحيث أن 1 u يكافئ طاقة مقدارها 931.5 MeV ، فإن الطاقة المنطلقة هى

$$\text{الطاقة} = (931.5\ MeV/u)\,(0.00597\ u) = 5.56\ MeV$$

ويحمل جسيم α معظم هذه الطاقة ، حيث أن الطاقة التى قيست له هى 5.49 MeV . ويعود الاختلاف بين هذه القيمة والطاقة الكلية المفقودة ؛ إلى طاقة ارتداد النواة الوليدة . ■

8-28 التفاعلات النووية

تعتبر نظم اضمحلال جسيمات α و β التى وصفناها فى القسم الماضى نماذج بسيطة للتفاعلات النووية . ومعادلات التفاعلات النووية لابد أن تكون متوازنة مثل معادلات التفاعلات الكيميائية تمامًا . ولابد من أن تحقق التفاعلات النووية قوانين البقاء فى الفيزياء حتى يتم التوازن . وسنهتم حاليًا ببقاء الشحنة وعدد النويات فحسب .

ومجموع كل النويات فى أى تفاعل نووى (أو قيم A) على أحد جانبى التفاعل لابد أن يساوى المجموع على الجانب الآخر من التفاعل . وعلى ذلك ففى اضمحلال α ،

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow \, ^{222}_{86}Rn + \, ^{4}_{2}He$$

ومن الواضح أن قيم A متساوية على الجانبين ؛ 4 + 222 = 226 . وعلاوة على ذلك ، ولأن الشحنة أيضًا لابد من بقائها ، فإن مجموع قيم Z لابد أن تكون متساوية على الجانبين . وفى التفاعل الراهن فإن 88 = 2 + 86 .

وإلى جانب عدد النويات والشحنة فهناك كميات أخرى لابد أن تكون محفوظة ؛ وعلى التفاعلات النووية الخضوع لقوانين البقاء هذه . وقد أشرنا من قبل أن النيوترينو ينبعث أثناء اضمحلال β ؛ وبدون ذلك فإن تفاعل اضمحلال β سيفتقر إلى حفظ (بقاء) كمية التحرك الخطية والزاوية والطاقة . ولابد للطاقة أيضًا ، بما فى ذلك الطاقة المكافئة للكتلة ، أن تكون محفوظة فى التفاعلات النووية .

إن حقيقة كون الطاقة الكلية قبل التفاعل (بما فى ذلك الطاقة المكافئة لكتل السكون)

لابد وأن تكون مساوية للطاقة الكلية بعد التفاعل ، مفيدة جدًا كأداة لدراسة التفاعلات النووية . وعندما أجرى رذرفورد واحدًا من أوائل التفاعلات النووية عام 1918 ، مثلاً ، فقد أطلق جسيمات α على نوى النيتروجين ورصد التفاعل الآتي :

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

وبعبارة أخرى ، فإن جسيم α دخل إلى نواة ^{14}N ، التي تفتتت بإطلاق بروتون . أى أن نواة النيتروجين الأصلية قد **تحولت** إلى نواة أكسجين .

ولكى نعرف المزيد عن هذا التفاعل ، يمكننا الرجوع إلى الجدول الوارد فى الملحق رقم (1) ، لكى نحسب كتل النوى المتفاعل قبل وبعد التفاعل :

الكتل قبل التفاعل	الكتل بعد التفاعل
كتلة ^{14}N = $14.0031\ u - 7\ m_e$	كتلة ^{17}O = $16.9991\ u - 8\ m_e$
كتلة ^{4}He = $4.0026\ u - 2\ m_e$	كتلة ^{1}H = $1.0078\ u - 1\ m_e$
الكتلة الكلية = $18.0057\ u - 9\ m_e$	الكتلة الكلية = $18.0068\ u - 9\ m_e$

يتضح من هذا أن كتلة النواتج أكبر من كتل المواد الداخلة فى التفاعل ، بفرق يبلغ 0.0012 u . ولا يمكن إيجاد هذه الكتلة **إلا إذا أضيف مقدار من الطاقة إلى المجموعة** . وحيث أن 1.0 u تكافئ طاقة مقدارها 931.5 MeV ، كما رأينا فى المثال التوضيحى رقم 3-28 ، لذا فإن الزيادة فى الكتلة ، والتى ظهرت فى هذا التفاعل ، تتطلب طاقة خارجية مقدارها $(0.0012)(931/1) = 1.1\ MeV$ ولابد لجسيم α الساقط من طاقة حركة بهذا المقدار على الأقل حتى يجعل هذا التفاعل قابلاً للحدوث . والواقع أنه لما كان لابد لكمية التحرك أن تظل محفوظة أيضًا فى مثل هذا التفاعل ، فإن النواتج النهائية لن تقف ساكنة عن الحركة ، ونتيجة لذلك كان لابد أن يتخذ الجسيم طاقة أكبر من 1.1 MeV حتى يكون التفاعل ممكنًا .

أما التفاعلات النووية التلقائية كالنشاط الإشعاعى فإنها تحدث لأن النواة تكون أكثر استقرارًا بعد التفاعل (أى أكثر ترابطًا) عن ذى قبل . ولكى نحدد ما إذا كانت نواة معينة مستقرة أم لا ، فإننا نستطيع أن نحدد أولاً النواتج التى ستؤول إليها ، بناءً على قوانين بقاء A و Z . ثم نستطيع أن نفحص كتل تلك النواتج ونقارن بين الكتلة الكلية لها وكتلة النواة الأصلية . فإذا حدث انخفاض فى الكتلة نتيجة التفاعل ، فإن التفاعل سيحدث تلقائيًا باحتمالية معينة ، مع إطلاق مقدار من الطاقة يمثله النقص الكلى .

مثال 4-28

هب أن لديك نواة مكونة من 9 بروتونات ، 11 نيوترونًا ، وكتلتها الذرية 19.99999 u . (أ) ما هو هذا العنصر ؟ (ب) ما هى النواة الوليدة التى ستنتج لو أن النواة الأصلية مرت باضمحلال ألفا ؟ أو باضمحلال بيتا ؟ (جـ) هل تعتبر أيًا من عمليتى الاضمحلال هاتين ممكنة ، أو أن النواة الأصلية مستقرة ؟

استدلال منطقى : 1

سؤال : ما هو العنصر الذى له $Z = 9$ وما هو عدد الكتلة له A ؟

الإجابة : إنه عنصر الفلور F . $A = 20$ ولهذا يكون لدينا ^{20}F .

سؤال : ما الذى يفعله كل من اضمحلال α و β فى قيم Z و A للنواة الأم ؟

الإجابة : يقوم اضمحلال α بخفض قيمة Z بوحدتين ، وقيمة A بأربع وحدات . أما اضمحلال β فيزيد قيمة Z وحدة واحدة ولا يغير من قيمة A . ولذلك فالنواتان الوليدتان هما $^{16}_{7}N$ و $^{20}_{10}Ne$ ، على الترتيب .

سؤال : ما هو المبدأ الذى يحدد إمكانية حدوث الاضمحلال ؟

الإجابة : هو ما إذا كانت الكتلة الكلية قبل الاضمحلال أكبر أو أصغر عما ينتج بعد ذلك فإذا كانت أقل قبل الاضمحلال ، فإن الاضمحلال التلقائى لا يمكن أن يحدث .

سؤال : ما هى الكتل المشتركة فى اضمحلال α و β ؟

الإجابة : يمكنك العثور على البيانات التالية فى عدد من المراجع أو خريطة النويدات (النكليدات) بالنسبة للاضمحلال α $M(^4He) = 4.00260$ u و $M(^{16}N) = 16.00610$ u وبالنسبة لاضمحلال β $M(e-) = 0.00055$ u و $M(^{20}Ne) = 19.99244$ u .

الحل والمناقشة : بالنسبة لاضمحلال α فإن مجموع الكتل بعد التفاعل هو

$$M_{tot} = 4.00260 \text{ u} + 16.00610 \text{ u} = 20.00870 \text{ u}$$

وهذا **أكبر** بمقدار 0.00871 u من الكتلة الأصلية للفلور ^{20}F . ولذلك فإن اضمحلال α لن يحدث . ولإنتاج النواتج النهائية لاضمحلال α ، يتطلب الأمر **دخلاً** من الطاقة مقداره

$$(0.00871)(931.5) = 8.11 \text{ MeV}$$

ومن جهة أخرى ، فالكتل بعد اضمحلال بيتا سيكون مجموعها .

$$M_{tot} = 0.00055 \text{ u} + 19.9244 \text{ u} = 19.99299 \text{ u}$$

وهذا القدار أقل بنحو 0.00700 u من الكتلة الأصلية ، ولذلك يستطيع ^{20}F (ولا شك سيفعل) إجراء اضمحلال β ليصير ^{20}Ne وهى نواة مستقرة . أما الطاقة التى ستنطلق خلال العملية فهى $(0.00700 \text{ u})(931.5 \text{ MeV}) = 6.52$ meV .

28-9 سلاسل النشاط الإشعاعى الطبيعى

لاشك أن الحيرة قد انتابتك عندما علمت بالحقيقة القائلة بأن الراديوم 226 موجود على الأرض حاليًا . إن عمر النصف لهذا العنصر ـ بغض النظر عن أى شىء ـ هو 1600 سنة ، بينما يبلغ عمر الأرض عدة بلايين من السنين . وإذا لجأنا إلى قانون الاضمحلال ، لوجدنا أن نسبة العدد الموجود حاليًا فى نوى الراديوم إلى العدد الذى كان موجودًا منذ 4×10^9 سنة يجب أن تكون :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0.693t/T_{1/2}} = e^{-0.693(4 \times 10^9)/1600} \approx 10^{-740,000}$$

وهو كسر متناهي الصغر . ولابد لنا من استنتاج أنه تم تزويد الأرض بنوى راديوم جديد بعد أن انتهى منها النوى الأصلى . وإذا قمنا بحسابات مماثلة لوجدنا أن العديد من مصادر النشاط الإشعاعى الطبيعى ذات أعمار نصف أقصر بكثير من أن تفسر وجودها إلى الآن على سطح الأرض . دعنا ننظر فى كيفية وجود هذا النوى .

إن الراديوم والنوى المشع المماثل له موجودة على الأرض لأنها نواتج نظائر ذات عمر طويل للغاية . فاليورانيوم 238 ـ مثلاً ـ له عمر نصف يبلغ 4.47×10^9 سنة ، وهو يقارب فى ذلك عمر الأرض نفسها . إن نواة اليورانيوم هى النواة الأم لسلسلة كاملة من النوى المشع . وتضمحل نواة اليورانيوم تبعًا لنظام الاضمحلال :

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{234}_{90}\mathrm{Th}$$

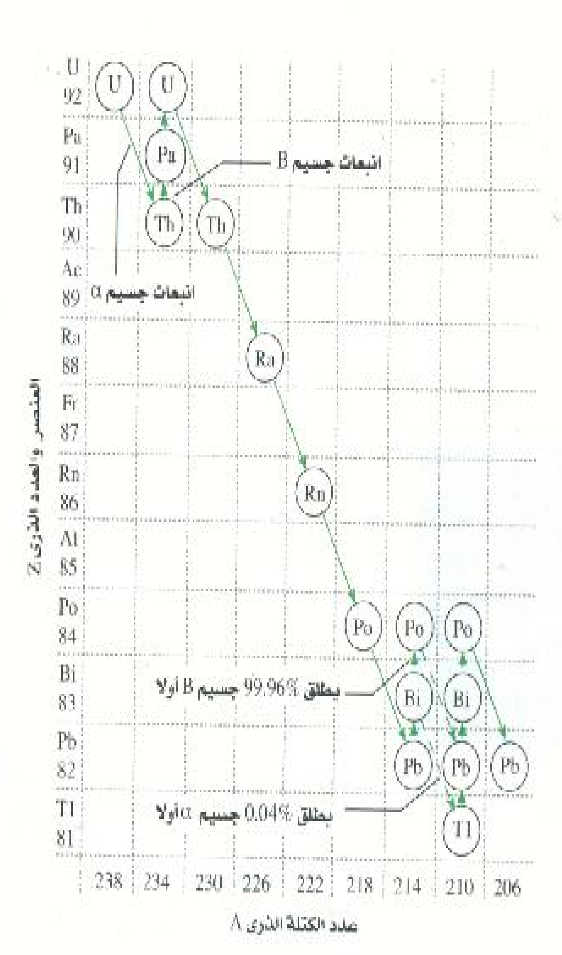
حيث النواة الوليدة هى نواة الثوريوم ، وهكذا يكون $^{238}\mathrm{U}$ هو المصدر الدائم لنظير الثوريوم ، الذى يضمحل بدوره بانبعاث β :

$$^{234}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$

حيث النواة الوليدة هى بروتاكتينيوم .

وينحل البروتاكتينيوم بدوره بانبعاث β إلى $^{234}\mathrm{U}$:

$$^{234}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{234}_{92}\mathrm{U} + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$$



شكل 8-28:
سلسلة نشاط إشعاعى نموذجية ، ويطلق عليها سلسلة اليورانيوم لأن النواة الأم هى اليورانيوم .

وتتضمن هذه السلسلة العديد من الخطوات الأخرى قبل الوصول إلى العنصر النهائى المستقر ، وهو فى هذه الحالة عنصر الرصاص ، ^{206}Pb . ويوضح الشكل 8-28 تفاصيل هذه السلسلة . ويلاحظ أن المراحل النهائية لنظام الاضمحلال لهذه السلسلة قد تنطوى على عدة بدائل ممكنة . ولكل إمكانية احتمال معين للحدوث كما يتضح من الشكل 8-28 لحالة ^{216}Bi . ويطلق على النسبة المئوية لإمكانيات الاضمحلال المختلفة **نسبة التفرع** بالنسبة لاضمحلال النواة الأم .

هناك أيضا سلسلتان طبيعيتان أخريان لاضمحلال النشاط الإشعاعى على الأرض . والجدول 1-28 يضم هاتين السلسلتين مع السلسلة التى تناولناها منذ قليل . ويلاحظ أن كلا من هذه السلاسل تبدأ بعنصر ذى عمر نصف طويل جدا وتضمحل فى نهاية الأمر لتصل إلى نظير مستقر للرصاص . ويفترض أن سلاسل اضمحلال أخرى قد وجدت على الأرض فى عصور سابقة ولكنها اضمحلت بسرعة أكبر من أن تكتشف فى وقتنا هذا .

جدول 1-28:
السلاسل الطبيعية للنشاط الإشعاعى

السلسلة	عنصر البداية	عمر النصف (سنة)	عنصر النهاية المستقر
اليورانيوم	$^{238}_{92}U$	4.47×10^{9}	$^{206}_{82}Pb$
الثوريوم	$^{232}_{90}Th$	1.41×10^{10}	$^{208}_{82}Pb$
الأكتينيوم	$^{235}_{92}U$	7.04×10^{8}	$^{207}_{82}Pb$

مثال توضيحى 7-28

إذا كان عمر الأرض 5×10^{9} سنة فما هو كسر الكمية الأصلية من ^{232}Th التى لا تزال موجودة على الأرض ؟ (يعتقد أن الأرض قد كانت منصهرة منذ ما قبل نحو 4×10^{9} yr)

استدلال منطقى : عمر النصف للنظير ^{232}Th هو 1.41×10^{10} yr ، ونعلم أن $N/N_0 = e^{-\lambda t}$. إلا أن $\lambda T_{1/2} = 0.693$ ولذلك $\lambda = 4.91 \times 10^{-11}$ y_r^{-1} . ومن ثم ،

$$\text{الكسر} = \frac{N}{N_0} = e^{-(4.91\times10^{-11}/yr)(5.0\times10^{9}\ yr)} = e^{-0.246} = 0.782$$

أى أن حوالى 78 بالمائة من ^{232}Th لازالت موجودة إلى اليوم .

تمرين : كم من السنوات يستغرق الثوريوم ^{232}Th الموجود على الأرض لكى ينخفض إلى ربع قيمته الحالية ؟ **الإجابة** : 2.82×10^{10} yr .

10-28 تفاعلات الإشعاع مع المادة

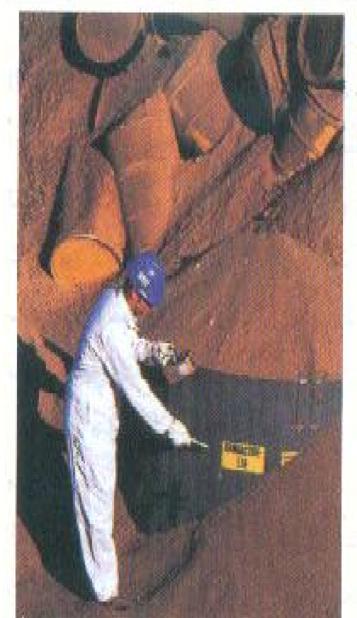
كلما زاد استعمالنا للقوى النووية ومصادر الإشعاع الأخرى ، كلما ازدادت أهمية الآثار التى يتركها الإشعاع على الجسم البشرى وعلى المواد المختلفة . فعندما يتغلغل جسيم داخل اللحم أو أية مادة أخرى فإنه يرتطم* بالذرات على طول مساره وبهذه الطريقة تحدث التأثيرات الرئيسية للإشعاع .



تكتشف أشعة إكس بسهولة بواسطة فيلم فوتوغرافى .

* لقد استخدمنا كلمة يرتطم بشكل غير دقيق ، فالجسيم إذا كان مشحونًا فإنه ليس بحاجة لأن يضرب إلكترونًا أو نواة حتى يحدث تلفًا ، لأن قوة كولوم المؤثرة على الإلكترونات والنوى من جانب الجسيم المشحون عادة ما تكون من الكبر بحيث تسبب التلف حتى لو لم يمر الجسيم بالقرب من الذرة . بل إنه حتى فى تصادم قريب مع ذرة أو جزئ ، فإن الجسيم قادر على تأيين الذرة أو جعل الجزئ ينهشم إلى أجزاء .

وتعتمد التأثيرات التى يحدثها جسيم ذو طاقة عالية على ثلاثة عوامل أساسية : كتلة الجسيم ، وطاقته ، وشحنته . إن جسيم α ، يستطيع نظرًا لأن كتلته 4u- أن يحدث تلفًا أكثر من الذى يحدثه إلكترون (0.00055 u) يتحرك بنفس السرعة عندما يصطدم بذرة ما . مثلما أن شاحنة وزنها 10 طن تحدث دمارًا أكبر بكثير من الذى تحدثه عربة أطفال . زد على ذلك أن لجسيم ألفا شحنة مقدارها +2e فى حين أن شحنة الإلكترون e- ؛ فهى لذلك تؤثر بقوة كولومية أكبر على الشحنات القريبة أكثر مما يفعل الإلكترون . ولهذه الأسباب يقوم جسيم ألفا بتأيين الذرات على طول مساره بشكل أكثر تكرارًا مما يفعل إلكترون له نفس الطاقة . على أن كلاً من جسيم ألفا والإلكترون يستمران فى الحركة إلى أن يفقدا كل طاقتهما وإن كان الإلكترون يقطع مسافة أطول أخرى قبل أن يتوقف ، مقارنًا بجسيم ألفا الذى له نفس الطاقة الابتدائية . وبعبارة أخرى فإن مدى الإلكترون أكبر من مدى جسيم ألفا الذى له نفس الطاقة . والقيم التقريبية لمدى الجسيمات التى طاقتها 2 MeV فى الهواء هى 1 cm بالنسبة لجسيم α ، 10 cm بالنسبة للبروتون 1000 cm بالنسبة للإلكترون وكلما زادت كثافة المادة التى يخترقها الجسيم ، كلما كان المدى أقصر ، أى أن المدى يتناسب عكسيًا تقريبًا مع الكثافة . وعلى ذلك يكون مدى جسيم ألفا فى الهواء 10 cm (كثافة الهواء $\rho = 1.29\ kg/m^3$) فى حين أن المدى يصبح نحو 0.005 cm فحسب حين يمر خلال الألومنيوم ($\rho = 2700\ kg/m^3$) ولعله قد أصبح واضحًا لديك لماذا يتم استخدام الرصاص ، وهو مادة عالية الكثافة ، فى الدروع الواقية من الجسيمات ذات الطاقات المرتفعة .



يمثل عداد جايجر أداة حساسة جدًا لقياس مستوى النشاط الإشعاعى .

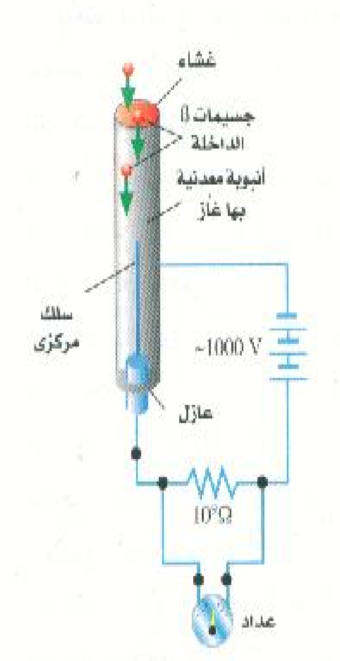
والنيوترونات ، التى لا شحنة لها هى جسيمات ثاقبة للغاية ، حيث أن قوى كولوم لا يمكن أن تؤثر عليها أثناء اختراقها للمادة . ولكى يتم إيقاف النيوترون أو إبطاء حركته لابد أن يصطدم مباشرة بنواة أو بجسيم آخر له كتلة مقاربة لكتلة النيوترون ولذلك تستخدم مواد مثل الماء والبلاستيك لإيقاف النيوترونات نظرًا لأنها تحتوى على الكثير من النوى ذى الكتل الصغيرة فى وحدة الحجوم .

وليس من السهل إيقاف أشعة جاما (وأشعة إكس) لأنها لا شحنة لها ولا كتلة سكون ، ولكنها تفقد طاقتها عندما تخترق المواد من خلال ظاهرة كومتون والأثر الكهروضوئى وهما عمليتان تؤديان إلى تكون الأيونات . ولابد أنك شاهدت صورًا بأشعة إكس للأسنان والعظام ولذا فأنت تعرف أن أشعة إكس تخترق اللحم وتكون ظلالاً للعظام . وكلما زاد عدد الإلكترونات فى ذرة ما داخل مادة تمتص الأشعة ، وكلما كانت تلك المادة أكثف ، كلما زادت قدرتها على إيقاف أشعة إكس وأشعة جاما .

28-11 الكشف عن الإشعاع

تستخدم فى معظم كاشفات الجسيمات والإشعاع ذات الطاقة المرتفعة ، حقيقة مفادها أن الأيونات تتكون على طول مسارات الجسيمات . وقد كانت المستحلبات الفوتوغرافية هى أول كاشفات للإشعاع ، وقد استخدمها بيكريل للكشف عن الإشعاع الصادر عن اليورانيوم عام 1896 . ويكمن عيب المستحلبات فى أنها لا تستخدم سوى مرة واحدة ، كما أنها تفتقر إلى الحساسية الفائقة للطرق الأحدث .

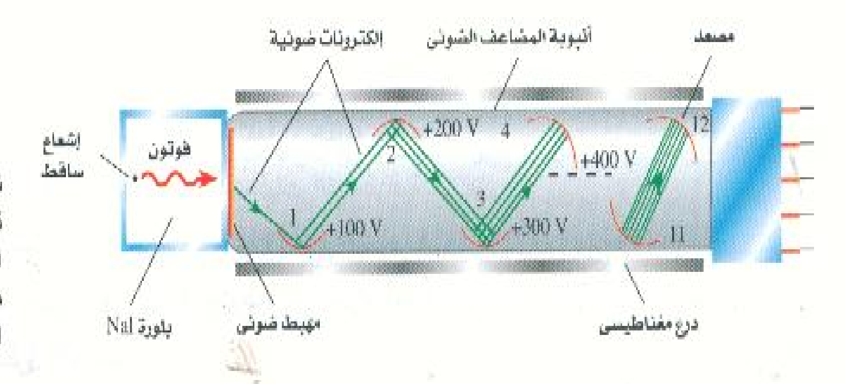
وهناك جهاز يتيح لنا أن نرى مسار الجسيم الذى يحدث التأين وهو **غرفة ويلسون السحابية** . وتتلخص فكرتها فى أن قطيرات من البخار فوق المشبع تفضل التكون على أيونات البخار . وعلى ذلك ، فإذا اخترق جسيم مؤين منطقة توشك قطيرات البخار أن تتكون فيها ، فإن تلك القطيرات ستتكون أولاً على طول مسار الجسيم بحيث يبدو المسار كآثار من القطيرات . وهناك جهاز آخر مشابه يسمى **الغرفة الفقاعية** ، يستخدم فيها سائل فائق التسخين ، أى سائل على وشك الغليان ، وتتكون فقاعات البخار بحيث تفضل مواقع الأيونات ولذلك تصبح مسارات الجسيم مرئية على هيئة آثار من الفقاعات .



شكل 9-28:
عداد جايجر .

أما الأجهزة الإلكترونية المستخدمة للكشف عن الجسيمات عالية الطاقة ، فاستخدامها مناسب وهى أكثر أنواع كاشفات الجسيمات شيوعًا . ومن نماذجها المألوفة **عداد جايجر** الذى يصوره الشكل 9-28 . عندما لا يكون هناك إشعاع داخل إلى العداد فإنه لا توجد شحنات فى الغاز الذى يملأ الأنبوبة المعدنية ولذلك لا يمر أى تيار فى الدائرة . أما إذا داخل جسيم مؤيِّن إلى الأنبوبة فإن ما يحرره ما أيونات والكترونات تتحرك عبر الأنبوبة تحت تأثير المجال الكهربى القائم بين الأسطوانة والسلك المركزى . ويكون المجال الكهربى من الكبر بحيث تقوم الأيونات والإلكترونات بتأيين ذرات أخرى بالغاز كلما تحركت عبر الأنبوبة مما ينشأ عنه انهمار للشحنات . ونتيجة لذلك يصبح التيار المار عبر الأنبوبة أكبر بكثير من التيار الذى من الممكن أن ينشأ عن الأيونات الأصلية بمفردها . وبمجرد اختراق الجسيم للأنبوبة تمامًا ، فإن جميع الأيونات تُجمع ويختفى التيار ، وعلى ذلك يؤدى كل جسيم مؤين إلى ظهور نبضة تيار تسرى فى المقاوم . ثم تطبق نبضات الجهد الناتجة على نظام تسجيل إلكترونى يتيح تسجيلاً لعدد الجسيمات المؤينة التى دخلت إلى العداد .

تستخدم **عدادات الوميض** نوعًا من المواد التى ينطلق منها الضوء إذا ما اخترقتها جسيمات ذات طاقة كبيرة . ومن بين تلك المواد بلورات يوديد الصوديوم المحتوية على قليل من عنصر الثاليوم وكذا بعض أنواع البلاستيك العضوى . ثم تصطدم الفوتونات المنبعثة بواسطة الجسيمات الساقطة بمهبط أنبوبة المضاعف الضوئى فتنبعث منه إلكترونات ضوئية (الشكل 10-28) . وتتسارع هذه الإلكترونات فى جهد كهربى قيمته نحو 100 V لتصل إلى قطب ثان حيث ينتج كل منها عددًا من الإلكترونات الإضافية . وتتكرر هذه العملية عبر عدد من المراحل يتراوح بين 12 إلى 15 مرحلة ليتكون فى النهاية انهمار للإلكترونات ، وبالتالى نبضة تيار مكبرة عند خرج الأنبوبة . . وتعبر هذه النبضة عن وجود الجسيم الأصلى الذى اصطدم بالكاشف .



شكل 10-28:
تحول أنبوبة المضاعف الضوئى الفوتون الناتج من الإشعاع الساقط إلى نبضة مكبرة من الإلكترونات . ويعرف هذا الجهاز بعداد الوميض .

وتعتبر وصلة pn شبه الموصلة أحد أنواع الكاشفات ، وتستخدم بها نبضات تتولد عندما يتسبب شعاع جاما أو جسيم ما في وجود شحنات داخل شبه الموصل ولمثل هذه الكاشفات زمن استجابة سريع ، وهي رخيصة نسبيًا وذات كفاءة .

يعتمد ما نلجأ إليه من الكاشفات العديدة على نوع الجسيمات (أو الإشعاع) المراد قياسه ، وعلى مدى الطاقة الذى نتعامل معه ، وعلى مدى عدم الملاءمة الذى يمكن التسامح معه .

28-12 وحدات الإشعاع

لقد أصبحنا نهتم أكثر فأكثر في عالمنا المعاصر بتأثيرات الإشعاع ؛ وقد أصبح من الأمور المهمة في حياتنا أن نعرف هل تلك التأثيرات ناشئة عن الفحوص الطبية والتشخيصية ، أم من الحوادث النووية ، أم من غاز الرادون الذى يتسرب إلى مساكننا من باطن الأرض . وقد تراكمت على مدار السنين وحدات كثيرة للإشعاع ، تستخدم لوصف آثاره مما نتج عنه كثير من اللبس . على أن وحدات SI (النظام الدولى) قد صارت حاليًا هي المهيمنة ، وأدى ذلك إلى التبسيط . وفيما يلى سنقوم باستعراض أهم الكميات المقاسة ووحداتها .

فاعلية المصادر

تعتبر **فاعلية** مصدر للإشعاع كما ذكرنا سابقًا ، هي عدد التفتتات التي تحدث في المصدر في وحدة الزمن :

$$\text{فاعلية المصدر} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \tag{28-5}$$

حيث ΔN هو عدد النوى الذى يضمحل في زمن مقداره Δt .

ووحدة SI للفاعلية هي **البيكريل** (Bq) ؛ والمصدر الذى فاعليته بيكريل واحد (1 Bq) هو الذى يحدث به تفتت واحد في الثانية . وهناك وحدة أقدم من هذه وإن كانت لا تزال منتشرة وهي **الكورى** (Ci) حيث $1\ \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}$ تمامًا . ولكي تتصور حقيقة هذه الأرقام ، تشير إلى أن فاعلية مقدارها $3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}\ (1\ \text{Ci})$ أكبر ملايين المرات من حيث النشاط الإشعاعي من كثير من المصادر الطبية المشعة .

وسنلجأ إلى المعادلتين (28-2) و (28-3) ، لكي نحصل على المعادلة التالية للفاعلية بدلالة ثابت الاضمحلال وعمر النصف :

$$\text{الفاعلية} = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{0.693N}{T_{1/2}} \tag{28-6}$$

وتطبيق هذه المعادلة مبين في المثال التوضيحى 8-28 .

الجرعة الممتصة

يطلق اصطلاح **الجرعة الممتصة** على كمية الطاقة التى تمتصها وحدة الكتل من مادة تعترض مسار حزمة الإشعاع . والوحدات الدولية SI لها هي جول لكل كيلو جرام J/kg وهي في حالتنا هذه « **الجراى** » أو (Gy) . فإذا فرضنا أن حزمة إشعاع تخترق كتلة m وتودع فيها

مقدارا من الطاقة E ، فتكون الجرعة الممتصة من جانب المادة المكونة لهذه الكتلة هي :

$$\text{الجرعة الممتصة (Gy)} = \frac{E}{m} \qquad \text{J/kg}$$

وبعبارة أخرى فإن 1 Gy يكافئ طاقة ممتصة تساوى 1 J/kg . وهناك وحدة أخرى ، كثيرة الاستعمال وهى **الراد** rad ـ للتعبير أيضًا عن الجرعة الممتصة ، حيث 1 rad = 0.01 Gy .

الجرعة المكافئة بيولوجيًا (حيويًا)

لا يعتمد تأثير الإشعاع على الجسم البشرى على طاقة ونوع الإشعاع فحسب ؛ وإنما يعتمد أيضًا على المنطقة المعرضة من الجسم لذلك الإشعاع . ولكى نصف التأثيرات الحيوية للإشعاع فإننا نستخدم مقياسًا آخر للجرعة الإشعاعية وهى **الجرعة المكافئة حيويًا** ؛ وهى ببساطة الجرعة الممتصة مضروبة فى معامل يتضمن مقارنة تأثير الإشعاع المستخدم بتأثير أشعة إكس طاقتها 200 keV على اللحم . ووحدة هذه الجرعة هى « **السيفرت** » (Sv) . ولنضرب مثالاً على حزمة من جسيمات ألفا التى لها قدرة تدميرية على اللحم ؛ أكبر 15 مرة من قدرة أشعة إكس التى طاقتها 200 keV . فإذا كان لدينا جرعة مقدارها 1 Gy من جسيمات ألفا ، فإن الجرعة المكافئة حيويًا لأشعة إكس تكون 15 Sv . وعند تناول الإتلاف الإشعاعى للبشر والحيوانات ، فإن الجرعة المكافئة حيويًا تكون هى المقياس المناسب لذلك الإتلاف ، ومن الوحدات الأقدم وإن كانت لا تزال كثيرة الاستعمال ؛ وحدة « ريم » rem حيث 1 rem = 0.010 Sv .

مثال توضيحى 8-28

عمر النصف لعنصر الإسترونشيوم ^{90}Sr وهو 28 yr وهو من النواتج الخطيرة للتفجيرات النووية . ما هى فاعلية 1 g من ^{90}Sr ؟

استدلال منطقى : لدينا من المعادلة 6-28

$$\text{الفاعلية} = \frac{0.693N}{T_{1/2}}$$

وفى هذه الحالة $T_{1/2}$ = 28 yr أو 8.8×10^{8} s . ولكى نحسب N ، وهو عدد الذرات من عنصر ^{90}Sr فى 1 g ، فإننا نذكر أن 1 kmol من ^{90}Sr (وهو 90 kg) يحتوى على 6.02×10^{26} ذرة . ولذلك .

$$N = \frac{0.001\ \text{kg}}{90\ \text{kg}}\,(6.02 \times 10^{26}) = 6.7 \times 10^{21}$$

وباستخدام هذه القيم نجد أن الفاعلية تساوى 5.3×10^{12} .

تمرين : ما مقدار نظير ^{90}Sr الذى ينتج عنه تفتت واحد فى الثانية .

الإجابة : **1.89×10^{-16} kg** .

28-13 أضرار الإشعاع

يستطيع الإشعاع إلحاق الضرر بأى مواد بما فى ذلك المادة المكونة لأجسادنا وذلك لقدرته على تمزيق الجزيئات . وسنفحص فيما يلى الآثار المترتبة على التعرض لمختلف مستويات جرعات الإشعاع على الجسم .

إن من أكثر أنواع الإشعاع شيوعًا وأثرًا على البشر ، الأشعة فوق البنفسجية فى ضوء الشمس ، إذ أنها تؤدى إلى حدوث لفحة الشمس واسمرار الجلد . فالفوتونات ذات الطاقة العالية تمزق جزيئات الجلد عند اصطدامها بها مما يؤدى إلى الآثار التى تشاهد بسهولة . إلا أن الأضرار فى هذه الحالة قليلة الأهمية . وتمتص معظم الأشعة فوق البنفسجية فى ضوء الشمس بواسطة غاز الأوزون فى طبقات الجو العليا . إلا أنه قد لوحظ فى السنوات الأخيرة تآكل طبقة الآوزون ، استنادًا إلى أدلة علمية آخذة فى التنامى . وقد يرجع السبب فى هذا جزئيًا إلى استخدام الأيروسولات (أوعية الرش التلقائى) التى تبعث بغاز الكلورفلوروكربون ، وكذلك من أجهزة التبريد . وهناك خطر قاتل من أن تزايد الإشعاع فوق البنفسجى الذى يصل إلى سطح الأرض قد يرفع من نسبة الإصابة بسرطان الجلد .

إننا نتعرض بشكل دائم لإشعاعات أخرى إلى جانب ضوء الشمس ، فكل المواد المحيطة بنا تقريبًا بها نسبة ضئيلة من المواد المشعة . وعلى هذا يتعرض جسمك إلى مستوى منخفض من الخلفية الإشعاعية ، لا سبيل إلى تجنبه . وعادة ما يتعرض كل إنسان إلى خلفية إشعاعية مقدارها تقريبًا 1 mSv سنويًا .

أما المستويات المرتفعة من الإشعاع الذى يغطى الجسم كله فإنها تمزق خلايا الدم إلى درجة خطيرة بحيث يصعب معها استمرار الحياة . وإذا زادت الجرعة التى يتعرض لها الجسم بأكمله عن 5.0 Sv ؛ فإن الموت يصير متوقعًا . وحتى الجرعة التى يتعرض لها الجسم بأكمله وتصل إلى 1.0 Sv ، فإنها قادرة على إحداث مرض إشعاعى خطير للغاية وإن كان غير مميت . أما الجرعات التى تقع فى مدى 0.30 Sv أو أعلى فإنها تحدث اضطرابات فى الدم . وإذا قلت الجرعات عن هذا فإن التأثيرات العامة على الجسم تصبح غير ملحوظة تمامًا ، وإن كانت عواقبها تظل خطيرة .

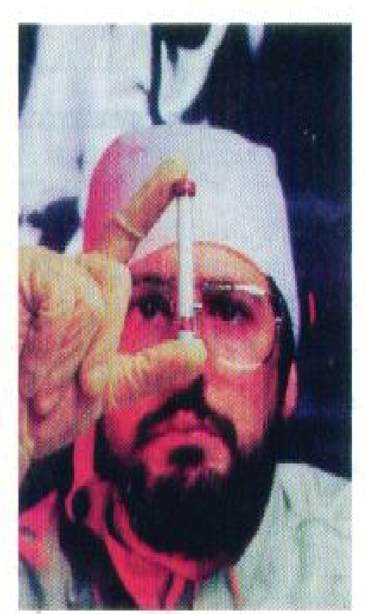
إن الجرعات الإشعاعية مهما كانت صغيرة ، ذات خطورة حقيقية إذا وصلت إلى المناطق التناسلية فى الجسم . ومثال ذلك أن جزيئات DNA فى أجسامنا والتى تحمل المعلومات المتعلقة بالتناسل ، قد تدمر نتيجة تعرض منفرد للإشعاع . وإذا تعرض عدد كاف من هذه الجزيئات للتلف ؛ فإن المعلومات التناسلية المشوهة تنتقل إلى الأجنة عند تكوينها . ويؤدى هذا إلى حدوث ولادات مشوهة . وعلى الرغم من أن هناك بعض الأدلة على أن المستويات المنخفضة من الاضطرابات التناسلية الشاذة قد تكون نافعة للجنس البشرى ، إلا أن معظم العيوب الخلقية ليست مستحبة . ولهذا السبب ، لا يجب أن **تتعرض أية أنثى فى سن الإنجاب لإشعاع لا ضرورة له وعلى الأخص للأعضاء**

التناسلية . أما صور الأشعة التى تجرى للذراع ، مثلاً ، وبصورة صحيحة ، فإنها لا تشكل خطرًا .

تشكل مستويات الإشعاع المنخفضة ـ بالإضافة إلى تشوهات المواليد ، اثنين من المخاطر . فهى تنذر أولاً ، بحدوث إصابات بالسرطان فى وقت متأخر . فعلى الرغم من عدم ظهور السرطان على الفور ، فإن المستويات المنخفضة من الإشعاع قد تجعله يتكون على مدى سنين عديدة بعد ذلك . ويكمن الخطر الثانى فى أن الأطفال أكثر تأثرًا بالإشعاع . ولأن الطفل ينمو بسرعة ، فإن التغيرات التى تطرأ على الخلايا بسبب الإشعاع قد تكون لها عواقب وخيمة . ولهذا السبب يمتنع معظم الأطباء عن طلب إجراء مسح بأشعة إكس للأطفال ما لم تكن هناك ضرورة حتمية .

وحيث أننا جميعا معرضون لإشعاع من الخلفية المحيطة بنا مقداره 1.0 Sv/yr ، فإنه لا معنى لأن نتعذب فى محاولات لتجنب جرعات إشعاعية أقل من هذا . وكقاعدة عامة فإن الجرعات المهنية مهمة جدًا وقد تم تحديدها بأن الجرعة السنوية القصوى هى 0.050 Sv ، ويستثنى من ذلك العيون والأعضاء التناسلية .

28-14 الاستخدامات الطبية للنشاط الإشعاعى



تستخدم النظائر المنتجة صناعيًا مثل التكنيسوم 99 ، على نطاق واسع كمقتفيات مشعة فى مجال الطب النووى .

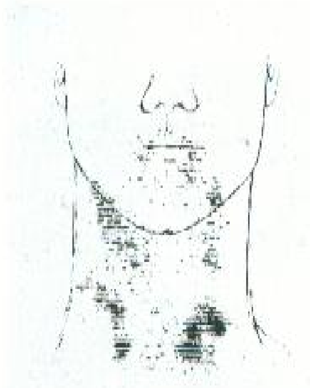
لقد كان استخدام الإشعاع الصادر من الراديوم ونواتج اضمحلاله ، فى علاج السرطان ، من أوائل التطبيقات المبكرة للنشاط الإشعاعى . وقد حدث تطور هائل منذ ذلك الحين ، على طرق العلاج بالإشعاع وذلك بسبب إنتاج العديد من المواد المشعة الجديدة بفضل وجود المفاعلات النووية والمعجلات النووية .

ويعتبر الكوبالت ^{60}Co من أهم النظائر المتاحة للبحوث العلمية والتطبيقات التكنولوجية . ولهذا النظير عمر نصف مقداره 5.27 yr وهو مصدر قوى لأشعة جاما التى تصل طاقتها إلى 1.2 MeV تقريبًا . وإشعاع جاما شديد النفاذية ويستخدم لقتل الخلايا السرطانية التى توجد على عمق داخل جسم الإنسان .

كما يستخدم إشعاع اليود ^{131}I لعلاج سرطان الغدة الدرقية . وعمر النصف لهذا النظير 8 أيام . وعندما نتناول طعاما يحتوى على اليود فإن كثيرًا من اليود يتمركز فى الغدة الدرقية ؛ ولذلك يتم حمل اليود 131 الموجود فى الطعام مباشرة إلى تلك البقعة من الجسم حيث يكون إشعاعه مطلوبًا لعلاج سرطان الغدة الدرقية . على أن هذا ليس سوى حالة واحدة يتم فيها نقل النظير المشع إلى نقطة محددة داخل الجسم حتى يتسنى وصول إشعاع موضعى ذى كفاءة عالية .

وتستخدم النظائر المشعة أحيانًا كعناصر اقتفاء حتى يتسنى تتبع مسار المواد الكيميائية الداخلة إلى الجسم . فلو أننا لم نكن بالفعل نعرف أن اليود يتركز فى الغدة الدرقية ، مثلاً ، فإن بمقدورنا التأكد من ذلك بملاحظة موقع النشاط الإشعاعى داخل الجسم بعد ابتلاع اليود 131 . ويستخدم علماء الحياة تقنيات مشابهة للتعرف على كيفية استفادة النبات من الكيماويات المختلفة .

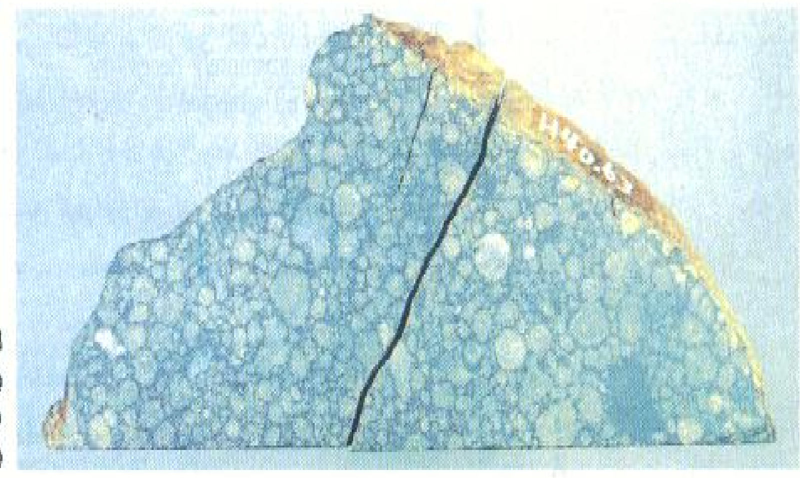
يوضح الشكل 11-28 استخدامًا آخر طبيًا للنشاط الإشعاعى . لقد تناول المريض الموضح بالشكل النظير جادولينيوم 67 وذلك بحقنة فى مجرى الدم . ويستقر هذا النظير عادة فى أنواع معينة من الأنسجة السرطانية . وكما هو مشاهد فى الشكل ، فإن النشاط الإشعاعى (وهو ممثل بالمناطق المظللة) قد تركز فى النسيج الليمفاوى للحلق والعنق وهذا ما يهيئ دليلاً قويًا على موقع السرطان عند هذا المريض .



شكل 11-28: يستقر الجادولينيوم 67 المشع ، الذى تم اقتفاؤه فى المسح الضونى هنا ، مفضلاً الأنسجة السرطانية .

15-28 التأريخ بالنشاط الإشعاعى

من التطبيقات المثيرة للاهتمام ، استخدام النشاط الإشعاعى فى تحديد عمر المواد القديمة . فيمكننا ـ على سبيل المثال ـ تحديد عمر الصخور الحاملة لعنصر اليورانيوم بالطريقة التالية . فحيث أن اليورانيوم 238 يضمحل ليؤول إلى الرصاص 206 (راجع الشكل 8-28) فإننا نخمن أن الرصاص 206 المختلط بشدة باليورانيوم 238 فى صخرة ما قد نشأ من اليورانيوم الذى اضمحل عبر السنين . افترض الآن أن تحليل الصخور قد اثبت أن أعداد ذرات كل من اليورانيوم والرصاص فى وحدة الحجوم هى N_U و N_{Pb} على الترتيب . وعلى ذلك تكون النسبة بين مقدار اليورانيوم الموجود حاليًا إلى المقدار الذى كان موجودًا منذ فترة t من الزمن ، عندما تجمدت الصخور المنصهرة هى :

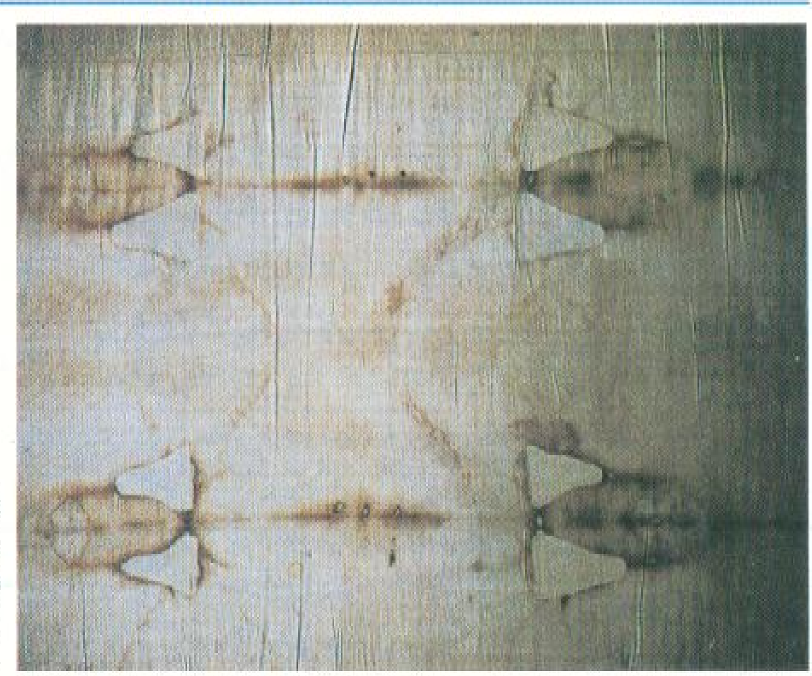


لقد أمكن تحديد عمر هذا النيزك باستخدام التأريخ بالنشاط الإشعاعى بطريقة الروبيديوم/الإسترونشيوم ، ووجد أنه 4.5 بليون سنة .

$$\frac{N_U}{N_U + N_{Pb}} = e^{-\lambda t} = e^{-0.963t/T_{1/2}}$$

حيث $T_{1/2}$ هو عمر النصف لليورانيوم 238 وهو 4.5×10^9 yr . وأقدم الصخور عمرًا على الأرض هى تلك التى بها $N_U \approx N_{Pb}$ ولذلك نقدر أن الأرض قد تجمدت منذ مدة تساوى عمر نصف واحد لليورانيوم 238 تقريبًا .

وقد استخدم نظام اضمحلال إشعاعى آخر ، على نطاق واسع ، لتأريخ عينات من صخور القمر والنيازك ، ويعتمد على اضمحلال β للنظير ^{87}Rb $(T_{1/2} = 4.88 \times 10^9 \text{ yr})$ التى يتحول إلى ^{87}Sr . وحيث أن أقدم صخور القمر عمرًا وكذلك النيازك هى ما تكونت فى المراحل المبكرة جدًا للنظام الشمسى ، فإن الفلكيين يعتبرون نتائج هذه الطريقة مفيدة



لقد كان أصل أكفان تورينو من الأسرار المحيرة ، ولكن الدراسات التى تمت باستخدام الكربون 14 قد أوضحت أن تلك الأكفان تعود إلى القرن الحادى عشر الميلادى تقريبا .

للحصول على تقدير لعمر الشمس والكواكب . وتدل التقديرات المبنية على عينات من نوعي الصخور على أن أقصى عمر تقريبى هو 4.6×10^9 yr بخطأ مقداره $\pm 0.1 \times 10^9$ yr تقريبًا . كما أن هناك نظائر مشعة أخرى تؤدى القياسات المستقلة لها إلى نفس العمر تقريبًا .

ولكي يمكن تحديد عمر الأشياء التي كانت في وقت من الأوقات حية كالخشب والعظام فإن العلماء يستخدمون تقنية تسمى التأريخ **بالكربون المشع** ، ويستخدم فيها النظير المشع للكربون C 14 . ويتم إنتاج هذا النظير بشكل دائم على الأرض نتيجة قذف نيتروجين الجو بالأشعة الكونية القادمة من الفضاء الخارجي . وعمر النصف لهذا النظير 5730 yr . وحيث أن الكربون المشع مطابق كيميائيًا للكربون ^{12}C ، فإن كل الكائنات الحية تحتوى على مزيج متلاحم من هذين النظيرين . وبمرور السنين ، فإن نسبة الكربون 14 إلى الكربون 12 تتخذ قيمة متوسطة هى 1.30×10^{-12} . إلا إنه عندما تموت شجرة مثلاً ، فإن الكربون 14 فى خشبها لن يمكن تجديده ، ولذلك يضمحل مقدار الكربون 14 بداخلها بعمر نصف مقداره 5730 yr ، وبمرور الزمن تتناقص النسبة $^{14}C/^{12}C$ وتتضاءل كذلك فاعلية الجرام الواحد من عينة ما . ويمكن استخدام هذه الحقيقة فى تعيين طول الفترة الزمنية التى انقضت منذ موت الشجرة .

مثال توضيحى 9-28

ما هو عدد العدات فى الدقيقة ، الذى تحصل عليه من عينة كتلتها 1 g من الكربون المأخوذ من قطعة جديدة من الخشب أو الألياف ؟

استدلال منطقى : تبلغ وفرة ^{14}C نحو 1.3×10^{-12} ، ويحتوى الجرام الواحد من الكربون على $(1/12)N_A$ ذرة ، ولذلك فهناك :

$$(1.30 \times 10^{-12})(\frac{1}{12})(6.02 \times 10^{23}) = 6.52 \times 10^{10}$$

ذرة من ^{14}C فى جرام واحد جديد من عينة من الكربون . وفاعلية هذا العـدد مـن النـوع المشع هى

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda t = \frac{0.693}{5730\ yr}(6.52 \times 10^{10})$$

$$= 7.89 \times 10^{6}\ counts/yr = 15.0\ counts/min\ ■$$

مثال 5-28

هب أنك قد حصلت على قطعة عظام بشريـة مـن أحـد الكـهوف . وعنـد اختـزال تلـك القطعة إلى كربون نقى فإن جرامًا واحدًا منه كان ذا فاعلية مقدارها 4 عدات فى الدقيقـة ناتجة من ^{14}C . منذ كم من الوقت كان يعيش ساكن ذلك الكهف ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة التى تربط بين الفاعلية وعمر العينة ؟

الإجابة : تتناسب الفاعلية مع وفرة ^{14}C الموجودة لحظة قياس عدد العدات :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\left(\frac{0.693}{T_{1/2}}\right)N$$

وعمر النصف مقدار ثابت بالنسبة لنظير مشع معين .

سؤال : ما هى العلاقة بين الفاعلية المشاهدة والفاعلية التى مقدارها 15 عَدَّة فى الدقيقة لعينة من الكربون الحالى (المثال التوضيحى 9–28) ؟

الإجابة : إن النسبة بين الفاعليتين تساوى النسبة بين عددى ذرات ^{14}C فى العينتين :

$$\frac{N\text{ (فى العينة القديمة)}}{N\text{ (فى العينة الجديدة)}} = \frac{4}{15}$$

سؤال : ما هى العلاقة بين فاعليتى العينة القديمة والعينة المعاصرة ؟

الإجابة : $\frac{4}{15} = \frac{N_0 e^{-\lambda t}}{N_0} = e^{-\lambda t}$

الحل والمناقشة : باستخدام العلاقة $\lambda = 0.693/T_{1/2}$ ، نجد أن

$$\frac{4}{15} = 0.267 = e^{-(0.693/5730\ yr)t}$$

$$\ln 0.267 = -1.32 = -\left(\frac{0.693}{5730\ yr}\right)t$$

ومنها نجد :

$$t = \frac{(1.32)(5730\ yr)}{0.693} = 10{,}900\ yr$$

إن معدلات العد المتناهية فى الضآلة بالنسبة للجرام من عينة يعود عمرها إلى أكثر من 4 إلى

5 أعمار نصف ، تتطلب عينات ذات حجم أكبر وعناية فائقة ويصل الحد الأقصى ـ حاليًا ـ للتأريخ بالنشاط الإشعاعي إلى نحو 8 إلى 9 أعمار نصف أو من 40,000 إلى 50,000 سنة .

28-16 التفاعل الانشطاري

لقد اتضح بعد اكتشاف النيوترون (عام 1930) أن هذا الجسيم المتعادل قادر على الدخول في تفاعلات نووية ، فهو يدخل إلى النواة بسهولة نظرًا لعدم وجود شحنة عليه . ويعتبر العالم إنريكو فيرمي هو الرائد في استخدام هذا المقذوف الجديد ، واستطاع في منتصف ثلاثينيات القرن العشرين أن ينتج العديد من النظائر التي كانت قبل ذلك مجهولة . ثم كان طموحه الرئيسي أن يقذف النوى الثقيل بالنيوترونات حتى ينتج عناصر ذات عدد ذرى Z أكبر من أية قيمة معروفة وقتها . وقد صادف النجاح بعض جهوده ، وأستأنف آخرون ما بدأه فيرمي وأمكن الآن إنتاج نوى يصل عدده الذرى إلى $Z = 107$.



(ب) (أ)

(أ) تستخدم المفاعلات النووية في كثير من الأغراض المفيدة بما في ذلك توليد القدرة الكهربية على نطاق تجاري ، إنتاج النظائر المشعة المستخدمة للتشخيص والعلاج الطبيين وكذلك في البحوث الفيزيائية الأساسية . والمفاعل المبين في الصورة في مفاعل للاختبارات المتقدمة في « إيداهو فولز » . وقد أسهم هذا المفاعل بشكل كبير في تحسين تصميم وتكنولوجيا المفاعلات .

(ب) توضح الصورة كيفية إخراج عنصر الوقود من باطن مفاعل للنظائر ذي الفيض المرتفع في المعمل القومية في أوك ريدج . ومرة أخرى نلاحظ إشعاع شيرينكوف الأزرق الناتج من النيوترونات التي تمرق (في الماء) بسرعة أكبر من سرعة الضوء والتي تصدر نتيجة التفاعلات الانشطارية و ينتج هذا المفاعل الذي قدرته 100 MW، أعلى فيض نيوتروني في العالم ، وهو حجر الزاوية في عمليات إنتاج وبرامج بحوث العناصر الأثقل من البلوتونيوم .

عندما قذف فيرمي اليورانيوم بنيوترونات ذات طاقة منخفضة جدًا تسمى **النيوترونات الحرارية*** ، فقد وجد بالفعل أن تفاعلاً مصحوبًا بإطلاق طاقة قد

* للنيوترونات الحرارية (ويشار إليها أحيانًا على أنها نيوترونات بطيئة) طاقات مساوية تقريبًا لمتوسط الطاقة الحرارية التي تحددها درجة حرارة الأجسام المحيطة بها kT . وعند درجة حرارة الغرفة فإن هذه الطاقة نحو 1/40 eV ، وهي أقل كثيرًا من الطاقة التي تصل إليها عندما تتكون كنواتج للتفاعلات النووية . وعلى الجانب الآخر فإن النيوترونات « السريعة » ، هي تلك التي طاقاتها 1 MeV أو أكثر . وتصبح النيوترونات السريعة نيوترونات حرارية عند مرورها بالعديد من التصادمات المؤدية إلى فقد الطاقة مع المواد المحيطة بها .

حدث . وباستئناف العمل من حيث تركه فيرمى ، فقد أجرى أوتوهاهن وفريتزستراسمان (عام 1939) تحليلاً كيميائيًا لنواتج التفاعل ؛ ووجدا لدهشتهما ، كثيرًا من العناصر ذات العدد الذرى الذى يدور حول $Z = 50$ ، من بين نواتج التفاعل . وكان الباريوم ، على وجه الخصوص هو أحد نواتج التفاعل . ماذا يمكن أن يكون قد حدث ؟ لقد أضافوا نيوترونًا واحدًا إلى نواة اليورانيوم $(Z = 92)$. وانتهى الأمر بالحصول على عنصر (الباريوم) عدد الذرى $Z = 56$. وعلاوة على ذلك ، فقد كانت هذه النيوكليدة ذات نشاط إشعاعى مرتفع ، مع أن الباريوم العادى مستقر .

لقد تشبثت ليز مايتز وابن أخيها أوتوفريس بأعمال هاهن وستراسمان واكتشفا تفسيرًا لهذه النتائج المحيرة . لقد أوضحا أن نواة اليورانيوم تقبض على النيوترون وتظل محتفظة به لكسر من الثانية ، ثم تنفجر إلى نواتين متساويتين بالتقريب فى الحجم . (راجع الشكل 12-28) . وقد أطلق على النواة فى المرحلة الوسطى اسم **النواة المركبة** . وينطلق فى التفاعل إلى جانب الطاقة ، نيوترونان أو ثلاثة . وانقسام النواة إلى شظيتين ذواتى حجم متساوٍ* وهو ما اصطلح على تسميته **الانشطار النووى** . وعلى الرغم من أن اكتشاف الانشطار النووى لم يكن فى **البداية** سوى فضول علمى بسيط عندئذ ؛ إلا أنه أسهم بشدة فى تغيير مسار التاريخ فيما بعد .

لقد أوضحت التحليلات التالية لهذا التفاعل أن هناك نظيرًا واحدًا فقط لليورانيوم هو الذى يوجد فى الطبيعة بكميات ، وهو القادرة على الانشطار بهذه الطريقة ، وهو اليورانيوم 235 الذى يمثل 0.7% فقط فى الخليط الطبيعى لنظائر اليورانيوم . والخطوة الأولى لحدوث تفاعل انشطارى هو اقتناص نيوترون (n) بواسطة ^{235}U لتكوين نواة مركبة :

$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U^*$$

حيث تعبر U^* عن النواة المركبة ، التى سرعان ما تضمحل عن طريق واحد من عدة تفاعلات محتملة . والتفاعل التالى ليس سوى أحد هذه الاحتمالات :

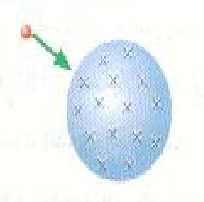
$${}^{236}_{92}U^* \rightarrow {}^{140}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 4\,n + \text{طاقة}$$

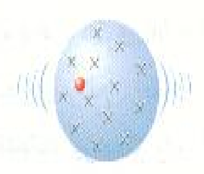
ونواتج التفاعل ليست نظائر ^{84}Kr ، ^{138}Ba المستقرة الموجدة فى الطبيعة . ومن ثم فهى تضمحل إلى نظائر أخرى ، وهذه تضمحل بدورها إلى نظائر تالية إلى أن نصل إلى الاستقرار . ونتيجة لهذا تكون نواتج التفاعل الانشطارى على درجة عالية من النشاط الإشعاعى ، والمواد المتفاعلة بمثابة مصدر قوى للإشعاع . على أن ما هو أهم من ذلك ، انطلاق كميات ضخمة من الطاقة نتيجة التفاعل .

ويمكننا الحصول على فهم لمصدر الطاقة المنطلقة إذا رجعنا إلى الشكل 3-28 الذى يبين قيم طاقة الترابط لكل نوية فى مختلف النوى . ولعلك تذكر أن النوى الذى له طاقة ربط عالية هو الذى له أيضًا كتلة لكل نوية أقل مما لدى النوى الذى طاقة ربطه

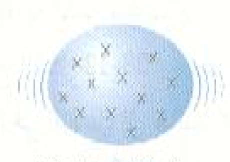
* تتوزع شظايا الانشطار التى تنشأ من عينة كبيرة من الانشطارات إحصائيًا إلى مجموعة ذات كتل صغيرة تتمركز حول 40% من الكتلة الأصلية ومجموعة ذات كتل كبيرة تتمركز حول 60% منها .

أقل . ويدل الرسم البياني أن الكتلة لكل نوية في الباريوم (Ba) ، مثلاً ، أقل من تلك التي لدى اليورانيوم . وبناء على ذلك ، إذا انشقت نواة اليورانيوم إلى نواتين لكل منهما عدد ذري Z قريب من 50 فإن النويات ستفقد كتلة في العملية . وهذه الكتلة المفقودة تنطلق على هيئة أشكال مختلفة للطاقة بما في ذلك الإشعاع وكذلك طاقة حركة النيوترونات ونواتج التفاعل الأخرى . وفي حالات الانشطار المتوسط لليورانيوم ^{235}U ، تصل الطاقة المنطلقة نحو 200 MeV وهي طاقة هائلة بالتأكيد .


(أ) قبل التفاعل ، $n + {}^{235}U$

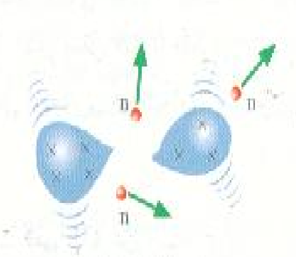

(ب) بعد التفاعل ، ^{235}U "

وأفضل الطرق لفهم عملية الانشطار هي باعتبار النواة الثقيلة كما لو كانت تسلك سلوك قطرة من سائل . وكما يتضح من الشكل 28-12 ، فإن إضافة نيوترون إلى النواة يجعل النواة تأخذ في الاهتزاز بشكل عشوائي مما يجعل موقفاً يطرأ كالذي يصوره الشكل 28-12 (د) . وفي هذه الحالة يتضاءل تأثير قوة التجاذب بسبب الزيادة الكبيرة في مساحة سطح النواة . وفيما يلي ذلك فإن قوى كولوم التنافرية تتولى دفع جزئي النواة بعيدًا عن بعضهما أكثر فأكثر ، ويحدث الانشطار للنواة ، كما هو موضح في الشكل 28-12 (هـ) . وتنطلق النيوترونات وتكون شظيتا الانشطار على درجة عالية من الاستثارة وعدم الاستقرار .


(جـ) القطيرة المهتزة


(د) تقوم قوى كولوم بمط النواة

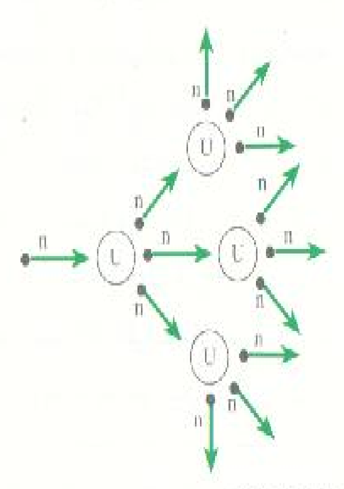
حيث أن انشطار نواة ^{235}U واحدة يؤدي في المتوسط إلى إنتاج ثلاثة نيوترونات وحيث أن النيوترونات هي التي تستحث نوى ^{235}U على الانشطار لذا فإن التفاعل المستمر ذاتيًا يصبح ممكنًا . تخيل كتلة من ^{235}U من الكبر بحيث يكون عدد النيوترونات التي تهرب من سطحها ضئيلة جدًا مقارنة بالعدد الكلي للنيوترونات ومن ثم ، إذا اقتحم نيوترون نواة ^{235}U ، فإنه يؤدي إلى ظهور ثلاثة نيوترونات ، مثلاً ، عندما تنشطر النواة . (لقد وجد بالتجربة أن العدد المتوسط لتلك النيوترونات هو 2.47) . وتقوم النيوترونات الثلاثة هذه بجعل ثلاث أنوية أخرى تنشطر ، فيتحرر بذلك ما مجموعه $9 = 3^2$ نيوترونات . وهذه النيوترونات تؤدي إلى انشطار مجموعة أخرى من النوى فينتج 3^3 نيوترونًا ، وهكذا . وهذه العملية التي يصورها الشكل 28-13 هي المسماة **بالتفاعل المتسلسل** وإذا تكررت q خطوة في التفاعل المتسلسل ، يصير لدينا 3^q نيوترون وإذا استغرقت كل خطوة 0.01 s فإنه بعد مرور ثانية واحدة ، يصير العدد الكلي للنيوترونات $3^{100} \approx 10^{48}$. ولما كانت 235 kg من اليورانيوم تحتوي على 6×10^{26} ذرة فحسب ، أصبح من الواضح أن تفاعلاً كهذا لابد أن يحدث بعنف متفجر .



(هـ) اكتمل الانشطار

شكل 28-12:
يؤدي اهتزاز النواة المركبة إلى انشطارها في نهاية الأمر .

هناك نواة أخرى مهمة قابلة للانشطار . بالإضافة إلى ^{235}U وهي نظير للبلوتونيوم أو $^{239}_{94}Pu$ وهو ينشطر بسهولة إذا قذف بنيوترون سريع ناتج من عملية الانشطار . وهكذا يمكن لتفاعل انشطاري متسلسل أن يستمر ذاتيًا داخل كتلة كبيرة بدرجة كافة من البلوتونيوم . والبلوتونيوم لا يتواجد كعنصر طبيعي ولابد من تصنيعه خلال ما يسمى **بتفاعل التوليد** ، حيث يتم تعريض ^{238}U لقذائف من النيوترونات فتحدث سلسلة من التفاعلات .



شكل 28-13:
يمكن للتفاعل المتسلسل أن يبدأ بنيوترون واحد .

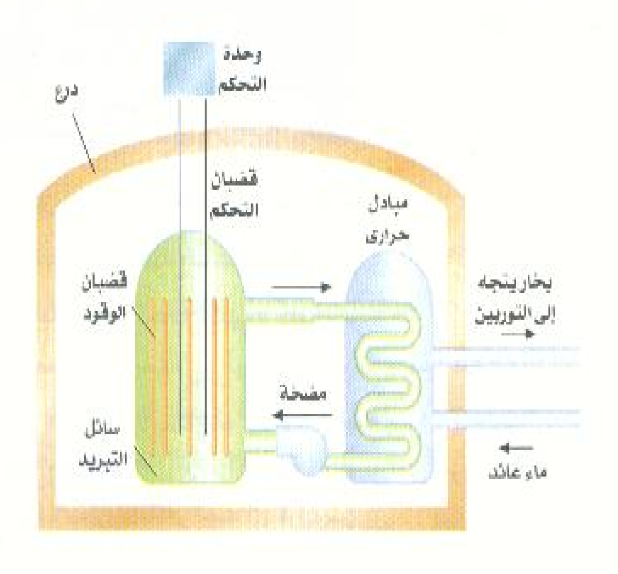
$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e$$

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e$$

وبالاختصار فإن ما يحدث هو تكوين ^{239}U عند امتصاص نيوترون ، وبدلاً من حدوث انشطار ، فإن هذه النواة تتحول عن طريق اضمحلال β إلى Np ، التي تضمحل بإطلاق جسيم β لتعطى Pu . وتتم عمليات اضمحلال β هذه بسرعة كبيرة بأعمار نصف تصل إلى 23.5 دقيقة و 2.35 يومًا على الترتيب . على أن ^{239}Pu مستقر نسبيًا ويضمحل بعمر نصف مقداره 24,400 سنة . وهكذا تتم ولادة نواة ^{239}Pu القابلة الانشطار من نواة ^{238}U غير القابلة للانشطار . والبلوتونيوم ^{239}Pu هو المادة المستعملة عمليًا فى جميع أسلحة الانشطار النووى فى العالم بأسره .

إن أساس عمل المفاعلات النووية هو التفاعل الانشطارى المتسلسل ، وإن كانت بعض الصعوبات قد تنشأ فى التطبيقات العملية . ولكى نصل إلى تفاعل مستقر غير متفجر داخل المفاعل فلابد أن تسفر كل عملية انشطار عن عملية انشطار إضافية واحدة (وليست عمليتان حتى لا يتفجر التفاعل ، ولا أقل من عملية واحدة وإلا خمد التفاعل) . وللمحافظة على ما يكفى من النيوترونات فى غرفة التفاعل ، فإن حجم المادة القابلة للانشطار ، لابد أن يكون من الكبر بحيث لا تتناثر نيوترونات أكثر من اللازم عبر سطحها وتفقد من التفاعل ، كما أن هناك **كتلة حرجة** بالنسبة للمادة القابلة للانشطار . فإذا كانت المادة المتاحة أقل من اللازم ، فلن تكون هنا نيوترونات كافية لإحداث تفاعل متسلسل مستمر ذاتيًا .

علاوة على ذلك ، فإن قدرة النيوترونات على أن تكون عرضة لأن تقتنص من جانب نواة ^{235}U ، تعتمد على سرعة هذه النيوترونات . فالنيوترونات البطيئة أكثر عرضة لأن تحدث انشطارًا عن النيوترونات السريعة . ولهذا السبب ، يتكون جزء كبير من حجم المفاعل النووى من المهدئ ، وهو عبارة عن مادة خاملة تستخدم فى إبطاء النيوترونات التى تنبعث خلال عملية الانشطار . وحيث أن كتلة النيوترون هى 1 u ، لذا فإن ما يبطئ حركتها أحسن ما يمكن هو تصادمها مع جسيمات لها تقريبًا نفس الكتلة . والمادة المهدئة فى المفاعلات تتكون عادة من مواد ذات وزن ذرى منخفض ، ومن الأمثلة الشائعة لها الكربون والماء ولدائن المواد الهيدروكربونية .

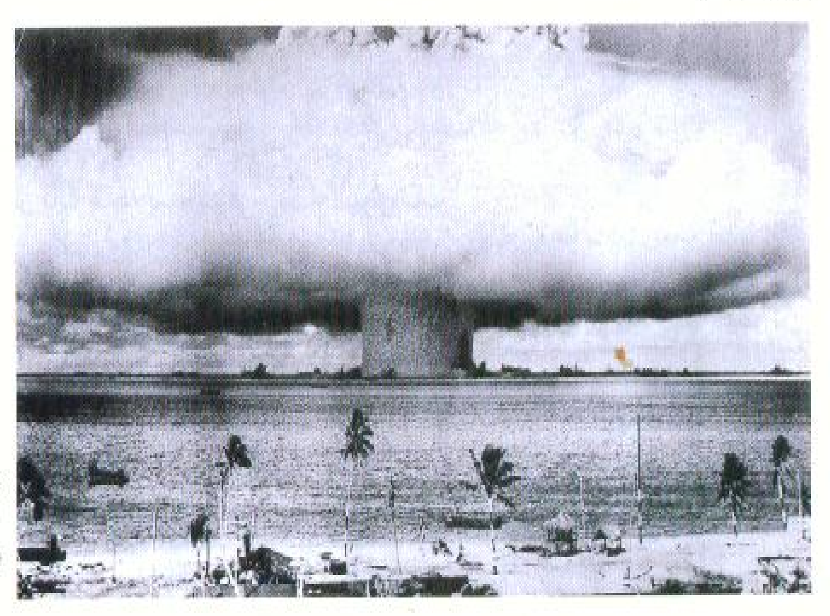


شكل 14-28:
رسم تخطيطى لمفاعل نووى انشطارى .

28-17 المفاعلات النووية

يؤدى المفاعل فى محطة للقوى النووية نفس الدور الذى يؤديه الفرن فى مولد بخارى فهو يعمل كمصدر حرارى شديد ، وتستخدم الحرارة فى توليد البخار الذى يدير بدوره توربينات نظام المولد الكهربى . ويوضح الشكل 14-28 رسمًا تخطيطيًا لمفاعل نموذجى .

يحتوى **قلب المفاعل** على المادة القابلة للانشطار وهى محفوظة داخل أنابيب ضيقة وطويلة من المعدن ومغلقة بإحكام ويطلق عليها **قضبان الوقود** . والوقود المستخدم فى المفاعلات التجارية فى الولايات المتحدة هو UO_2 ، حيث تتم زيادة النسبة المئوية للنظير ^{235}U من 0.7% الموجودة فى الطبيعة إلى نحو 3% خلال عملية تسمى **عملية إثراء** . وهى خطوة مهمة لتوفير عدد كاف من الأهداف القابلة للانشطار حتى يتم تشغيل كفء للمفاعل* . وتغمس القضبان فى الماء الذى يعمل كمهدئ وكمبرد فى نفس الوقت . فالماء ـ كمهدئ ـ يقوم بإبطاء النيوترونات الناتجة عن الانشطار مما يرفع ـ بالتالى ـ من الكفاءة التى تؤدى بها إلى انشطارات تالية . أما الحرارة النوعية الكبيرة للماء فتتيح له المحافظة على قضبان الوقود عند درجة حرارة التشغيل ، واستخراج الحرارة المتولدة فى القضبان لكى يسلمها إلى المبادل الحرارى حيث يتم إنتاج البخار .



نستطيع عن طريق اندماج الهيدروجين الحصول على طاقة على نطاق غير مسبوق ويصعب تصديقه .

يتم استخدام سلسلة من **قضبان التحكم** المصنوعة من البورون أو الكادميوم للمحافظة على معدل مستقر للانشطار وذلك لأنها قادرة على امتصاص النيوترونات ومن السهل إدخال هذه القضبان أو سحبها من قلب المفاعل . وكلما أدخلت لمسافة أكبر ، كلما زاد

* إن مطلب الحصول على يورانيوم صالح لعمل أسلحة نووية يتم فيها تفاعل تفجيرى غير محكوم ، يقتضى إثراء نحو 85 بالمائة من ^{235}U على الأقل . إن الفرق الهائل بين هذا التركيز لليورانيوم القابل للانشطار وذلك المستخدم فى المفاعلات السلمية هو أن الأخيرة لا يمكن أن ينفجر تحت أى ظرف من الظروف بقوة قنبلة نووية .

امتصاصها للنيوترونات وبهذا يقل عدد عمليات الانشطار التى تقوم بها . وإذا ما أدخلت القضبان إلى أقصى مدى لها فإن التفاعلات تتوقف تمامًا .

وإذا كانت قضبان الوقود هى التى تنتج القدرة ، فلابد أن تكون معرضة لحدوث تغيرات مهمة بداخلها ، حيث تتراكم شظايا الانشطار ذات النشاط الإشعاعى المرتفع . وتشع هذه المواد جسيمات β ذات الطاقة المرتفعة بمعدلات كبيرة بحيث أن 7% من الناتج الكلى للقدرة الحرارية يكون بسبب هذا النشاط الإشعاعى . وعند حدوث أى طارئ مثل خلل فى سريان المبرد فإن النسبة المتبقية وهى 93% من القدرة الناتجة يمكن إيقافها على الفور وذلك بإدخال قضبان التحكم إلى قلب المفاعل . على أنه لا توجد طريقة يمكن بها إيقاف النشاط الإشعاعى لشظايا الانشطار . وهذا المصدر كافٍ لصهر مجموعة قضبان الوقود والتسبب فى ارتفاع متزايد لدرجات الحرارة والضغط مما قد يدمر هيكل المفاعل . ولتجنب هذا التأثير ، فإن نظامًا منفصلاً لتبريد القلب يتم تشييده داخل المفاعل تحسبا للطوارئ . وللمفاعلات الموجودة فى الولايات المتحدة سجل ممتاز من حيث أمان التشغيل على مدى الأعوام الثلاثين الماضية .

ومن التغيرات المهمة الأخرى ، التى تحدث فى قضبان الوقود ، تراكم مادة البلوتونيوم نظرًا لقيام بعض النيوترونات السريعة بالتصادم مع نوى ^{238}U والتسبب فى حدوث تفاعلات مولدة . وتراكم البلوتونيوم هذا من النواتج الحتمية لتشغيل المفاعل ؛ حيث تتكون من 50 إلى 55 نواة ^{239}Pu عند حدوث مائة عملية انشطار فى ^{238}U .

يتطلب هذان النوعان من التغيرات فى قضبان الوقود أن تتم إزالتها طالما كان هناك قدر ملموس من ^{235}U غير المستنفد . وعندما أنشئت المفاعلات أول مرة ، فقد كان مخططًا أن يعاد تشغيل هذه القضبان المستهلكة . فاليورانيوم يمكن إعادة إصلاحه ، والبلوتونيوم يمكن فصله كيميائيًا ، أما شظايا الانشطار ذات النشاط الإشعاعى المرتفع فيتم التخلص منها بدفنها فى باطن الأرض بعد حفظها داخل أوعية محكمة الإغلاق . على أن إعادة التشغيل محفوفة بمخاطر كثيرة ـ كما اتضح فيما بعد ـ ولهذا هجرت . أما عمليات التخلص من النفايات فقد تم تطويرها ، ولكن لم نصل إلى حل مقبول سياسيًا ـ لسوء الحظ ـ يضمن تخلصًا دائمًا منها .

وخلافًا لليورانيوم فإن البلوتونيوم ليس بحاجة لعمليات الإثراء حتى يصير صالحًا للاستعمال فى الأسلحة النووية . كما أن حقيقة إمكانية فصل البلوتونيوم كيميائيًا من قضبان الوقود المستنفد ـ تتيح تراكم العديد من الكتل الحرجة للبلوتونيوم من نواتج تشغيل مفاعلات اليوارنيوم العادية . ولذلك فإن انتشار وتكاثر أسلحة البلوتونيوم يصبح ممكنًا تحت رداء الإنتاج السلمى للطاقة الكهربية من المفاعلات الانشطارية الحالية .

وتنتج المفاعلات المتخصصة النظائر المشعة المستخدمة فى التشخيص والعلاج الطبيين وكذلك فى العمليات الصناعية . وتتم صناعة الكثير من مصادر الإشعاع المستخدمة حاليًا فى المستشفيات والصناعة ومعامل البحوث ، وذلك بوضع المواد المناسبة داخل قلب المفاعل . وبالإضافة إلى ذلك ، تتواجد مفاعلات الأبحاث فى أجزاء كثيرة من

العالم . ويتم فى تلك المفاعلات مد « أنابيب » تنقل الإشعاع الشديد من قلبها إلى خارج المفاعل لتستخدم كحزم قوية من الإشعاع . وهكذا نرى أن للعمليات الانشطارية إمكانية هائلة كما أن لها مخاطر ضخمة للبشرية .

مثال 28-6:

يقوم مفاعل انشطارى نموذجى بتحويل ثلث الحرارة الناتجة من عمليات الانشطار إلى قدرة كهربائية مقدارها 1000 MW . ما عدد عمليات انشطار ^{235}U فى الثانية تلزم لحدوث هذا التحويل ؟ وما هى كتلة ^{235}U التى سيستهلكها المفاعل فى عمليات الانشطار خلال عام من التشغيل ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : ما مقدار الحرارة التى لابد من انطلاقها من الانشطار لكى تنتج 1000 MW ؟

الإجابة : حيث أن كفاءة التحويل تساوى 1/3 ، لذا فإن إنتاج 1000 MW يتطلب إنتاج 3000 MW من عمليات الانشطار .

سؤال : ما مقدار الطاقة المنطلقة فى كل عملية انشطار ؟

الإجابة : نحو 200 MeV فى المتوسط .

سؤال : ما هى العلاقة بين عدد عمليات الانشطار وكتلة اليورانيوم ^{235}U المستخدمة ؟

الإجابة : يحتوى كل 235 g من ^{235}U على 6.02×10^{23} نواة .

الحل والمناقشة : أولاً نحول 3000 MW إلى MeV/s :

$$3000\ \text{MW} = \frac{3000 \times 10^{6}\ \text{J/s}}{1.6 \times 10^{-13}\ \text{J/MeV}}$$

$$= 1.88 \times 10^{22}\ \text{MeV/s}$$

وإذا كانت الطاقة المناظرة لكل عملية انشطار هى 200 MeV فإن عدد تلك العمليات هو

$$\frac{1.88 \times 10^{22}\ \text{MeV/s}}{200\ \text{MeV/fission}} = 9.4 \times 10^{19}\ \text{fission/s}$$

وعدد المولات التى تنشطر فى الثانية هو

$$\frac{9.4 \times 10^{19}\ /\text{s}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.56 \times 10^{-4}\ \text{mol/s}$$

ويصل هذا المقدار فى سنة إلى :

$$(1.56 \times 10^{-4}\ \text{mol/s})(3.16 \times 10^{7}\ \text{s/yr}) = 4930\ \text{mol/yr}$$

وعلى ذلك يتطلب تشغيل المفاعل لمدة عام كامل :

$$(4930\ \text{mol/yr})(0.235\ \text{kg/mol}) = 1.16 \times 10^{3}\ \text{kg/yr}$$

وهذه الكمية أكبر قليلاً من طن مترى (1000 kg) . وحيث أن كمية اليورانيوم ^{235}U هى

3% فقط من كتلة الوقود ، لذلك يستهلك الفاعل ما مجموعه نحو 35 طنًا متريًا من UO_2 المخصب كل سنة .

28-18 الاندماج النووى

إذا رجعنا إلى الشكل 3-28 لوجدنا أن النوى ذا العدد الذرى المنخفض كالليثيوم له طاقة ربط لكل نوية أصغر حتى مما لدى اليورانيوم . ومعنى هذا أن النويات فى النوى الذى عدده الذرى منخفض سيكون لديها كتلة لكل نوية أكبر مما لدى تلك التى فى النوى الذى عدده الذرى أكبر . أى أننا نستطيع تخيل ضم نوى صغير معًا لتكوين نوى أكبر ، وخلال ذلك ، نحول الكتلة إلى طاقة . وهذا النوع من التفاعل الذى يتم فيه ضم النوى الصغير معًا لتكوين نوى أكبر هو ما يسمى **الاندماج النووى** . ولكى نتصور الطاقات الهائلة التى تنطلق فى التفاعلات الاندماجية هيا ننظر فى مجموعة التفاعلات التى تؤدى إلى تولد جانب كبير من طاقة الشمس .

$$^1_1\text{H} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^2_1\text{H} + ^0_{+1}\text{e} + ^0_0\nu$$

حيث $^0_{+1}\text{e}$ إلكترون موجب (يسمى بوزيترون) و $^0_0\nu$ نيوترينو . ثم يتفاعل الديوتيريوم ^2_1H بعد ذلك :

$$^2_1\text{H} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He}$$

ثم :

$$^3_2\text{He} + ^3_2\text{He} \rightarrow ^4_2\text{He} + 2\,^1_1\text{H}$$

وكما ترى فإن ما حدث بالفعل هو اندماج أربعة بروتونات معًا لتكون نواة هليوم 4 .

ولكى نجد مقدار الطاقة المنطلقة فى هذه العملية ، علينا أن نجد الفقد فى الكتلة . إن كتلة البداية هى الخاصة بالبروتونات الأربعة $4 \times 1.007276 = 4.029104$ u ، بينما الكتلة النهائية هى الخاصة بنواة الهليوم 4 ؛ $4.002604 - 2\,m_e = 4.001506$ u . وهذا يبين أن الفقد فى الكتلة هو 0.0276 u ، والطاقة المكافئة لهذه الكتلة هى :

$$(0.0276\ \text{u})(931\ \text{MeV/u}) = 25.7\ \text{MeV}$$

ولكن 1 kg من الهليوم به $N_A/4$ ذرة ولذلك تكون الطاقة المفقودة فى تكوين 1 kg من الهليوم هى :

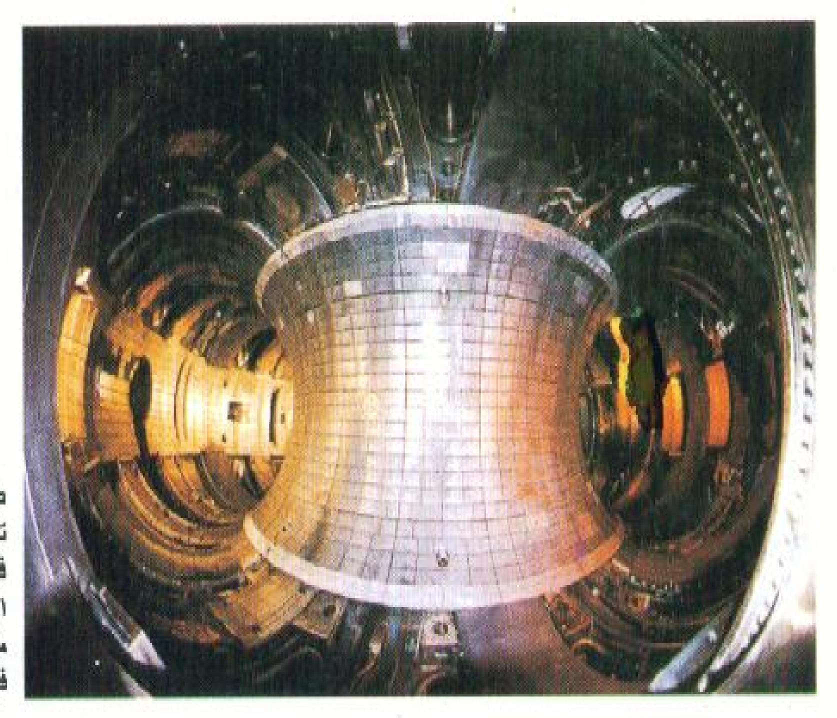
$$\text{الطاقة} = \frac{1}{4}(6 \times 10^{26})(25.7\ \text{MeV}) = 3.86 \times 10^{33}\ \text{eV} = 6.2 \times 10^{14}\ \text{J}$$

ومن المثير للاهتمام مقارنة هذا المقدار من الطاقة ، بالطاقة المكافئة للكتلة الكلية الموجودة فى 1 kg من المادة : $E = mc^2 = 9 \times 10^{16}$ J ؛ أى أن الطاقة التى تنطلق بالاندماج ليست سوى 0.7% من هذا المقدار ، ولذلك يمكننا القول بأن نحو 0.7% من المادة هو

الذى يتحول إلى طاقة فى اندماج الـهيدروجين . وبحساب مماثل لانشطار 1 kg من ^{235}U نجد أنه ينتج طاقة مقدارها 8×10^{13} J وهو ما يناظر تحويل 0.1% من الكتلة إلى طاقة . وفى مقابل هذا فإن الاحتراق الكيميائى يعطى نحو 3.3×10^{7} J/kg فحسب من الوقود والأكسجين . أى أن التفاعلات الكيميائية لا تطلق سوى 10^{-7} من الطاقة - لكل كيلو جرام - التى تطلقها تفاعلات الاندماج والانشطار .

وعلى الرغم من أن مصدر الطاقة فى الشمس والنجوم هو عمليات الاندماج ، فإن التفاعل الاندماجى لم يمكن جعله مصدرًا عمليًا ومستقرًا للطاقة على الأرض حتى الآن . والاندماج - من حيث المبدأ - مصدر جذاب للغاية للطاقة ، فنواتجه وهو ^{4}He لا تشكل نفايات مشعة ولكنه عنصر نادر ومفيد جدًا . أما الوقود فهو موجود بوفرة لأن الهيدروجين من مكونات الماء . . وإذا دمجنا هذه الإمكانيات المتاحة مع كميات الطاقة الهائلة التى ينتجها الكيلو جرام لوجدنا أن لدينا مصدرًا لا ينضب للطاقة تقريبًا .

وتتركز صعوبة الحصول على تفاعل اندماجى مستقر فى أن التفاعل الاندماجى لا يمكن أن يحدث إلا إذا جعلت البروتونات على مسافة مساوية لمدى القوى النووية الشديدة وهى نحو 5×10^{-15} m ؛ وعند مثل هذه المسافة تصبح قوى كولوم التنافرية هائلة جدًا . وبعبارة أخرى فإن طاقة الوضع الكهربية عند هذه المسافات ، كبيرة جدًا ومن رتبة 1 MeV ، وهى مقاربة لطاقة الحركة التى يجب إعطاؤها للبروتونات حتى تندمج قبل أن تتنافر بواسطة قوة كولوم . ومن السهل الحصول على هذه الطاقة بواسطة المعجلات الضخمة للجسيمات . إلا أن كفاءة تلك الآلات لا زالت أقل من أن تجعل هذه التفاعلات عملية . وعلينا أن نستغل التصادمات **الحرارية** بين البروتونات فى الغاز الحار للغاية . وسنحاول أن نعرف ما هى درجات الحرارة التى قد تلزم لإتمام الاندماج بهذه الطريقة .



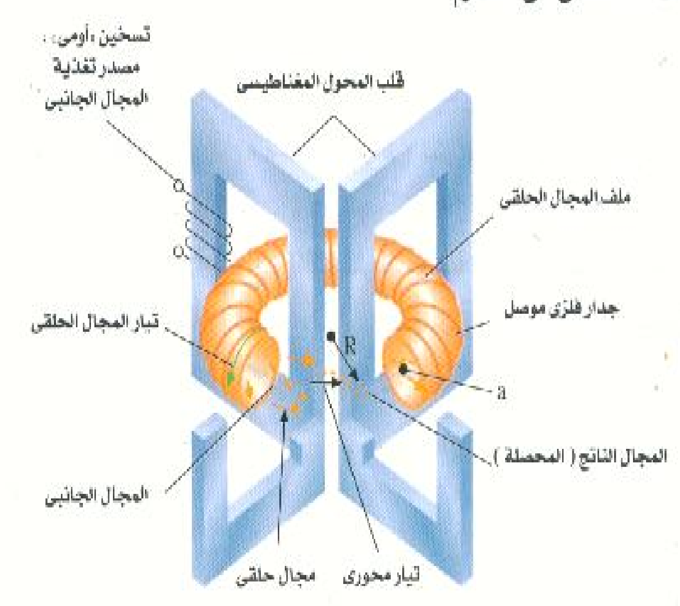
صورة لباطن مفاعل الاندماج المسمى توكاماك . ويستخدم الفيزيائيون هذا الجهاز فى دراسة الخواص المميزة لتفاعلات الاندماج المحددة مغناطيسيًا ، بهدف تطوير مفاعل اندماجى على نطاق تجارى عملى فى المستقبل .

نعلم من نظرية الحركة للغازات أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجسيم ما في غاز درجة حرارته T هو $\frac{3}{2}kT$. فإذا ساوينا هذه الطاقة بالمقدار 1 MeV أو 1.6×10^{-13} J لوجدنا :

$$\frac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K})T = 1.6 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

ومن ثم :
$$T = 7.6 \times 10^{9}\ \text{K}$$

إن مطلب درجات الحرارة المرتفعة جدًا هو السبب في تسمية هذا التفاعل **بالاندماج النووى الحرارى** . وطاقات الجسيم موزعة ـ بطبيعة الحال على مدى كبير من القيم حول هذا المتوسط . وعندما تكون قيم الكثافة في قلب الشمس وهى نحو 150×10^{3} kg/m³ متاحة ، فإن مقادير ضخمة من طاقة الاندماج يتم إنتاجها عند درجة حرارة مقدارها 15 مليون درجة بواسطة جسيمات تقع عند الطرف المناظر للطاقات العالية فى التوزيع الحرارى . والقدرة المشاهدة الناتجة عن الشمس بسبب الاندماج النووى هى 4×10^{26} watt ويتطلب هذا أن يندمج نحو 655 مليون طن من الهيدروجين (البروتونات) لتكوين 650 مليون طن من ^{4}He كل ثانية فى قلب الشمس . والشمس قادرة على احتواء هذا التفاعل الذى يتم عند درجة حرارة مرتفعة وذلك لشدة جاذبيتها أى أن الجاذبية (التثاقل) هى التى توفر احتواءً مستقرًا للتفاعل الاندماجى فى النجوم .



شكل 15-28:
نظام توكاماك الاندماجى ، ذو الحصار المغناطيسى ، حيث يقوم مجال مغناطيسى مركب بحصر الغاز عند درجات حرارة مرتفعة (بلازما) داخل منطقة على هيئة الدونت (أنبوبة حلقية) .

أما على الأرض ، فعلينا أن نبحث عن وسائل أخرى لاحتواء مثل هذا التفاعل شديد الحرارة . إننا قادرون على إنتاج اندماج بشكل **تفجيرى** ، كما يحدث مع القنابل الهيدروجينية ، ولكننا لم ننجح حتى الآن فى تنفيذ تفاعل نووى حرارى **محكوم** . وتنطوى محاولات الاحتواء لدينا على حقيقة مهمة وهى أن المادة تصبح مؤينة بدرجة كبيرة ، فتتكون من ثم من أيونات وإلكترونات منفصلة عن بعضها البعض فى حالة تسمى **بلازما** . ويمكن حصر الجسيمات المشحونة بواسطة مجالات مغناطيسية قوية ، وإن كانت درجات الحرارة المرتفعة والضغوط الهائلة سرعان ما تؤدى إلى حالات من

عدم الاستقرار التى تهدم الاحتواء . ولم يزد ما تم تطويره عبر السنين من البحوث فى العديد من البلدان ، عن محاولة لتسخين البلازما بسرعة كبيرة واحتوائها فى مجالات مغناطيسية لفترة طويلة بحيث أن ما ينتج من طاقة يفوق ما يستهلك منها قبل أن يتمزق الاحتواء . ويعتبر جهاز « توكاماك » من أكثر المحاولات الواعدة ، ويوضحه تخطيطيًا الشكل 15–28 ، وتقترب أزمنة الاحتواء من 1 s ومن المتوقع الوصول إلى نقطة التعادلية فى الطاقة (عندما تتساوى الطاقة الناتجة عن الاندماج مع ما يمد به جهاز التوكاماك من طاقة) مع زيادة حجم التوكاماك .

ويركز الباحثون حاليًا على تفاعلين اندماجيين يتمان عند درجات حرارة أقل من التى يحدث عندها تفاعل البروتون ـ بروتون . فتفاعل الديوتيريوم ـ تريتيوم $({}^2H - {}^3H)$ الاندماجى يحتاج « فقط » إلى $4 \times 10^7\ K$ ، أما تفاعل الديوتيريوم ـ ديوتيريوم $({}^2H - {}^2H)$ الاندماجى فيحدث عند $10^8\ K$. ويتم حاليًا أيضًا تجربة عدد من طرق التسخين وتم بالفعل الوصول إلى درجات حرارة قريبة من هذه . وتشير النتائج الحالية والتى ظهرت فى الولايات المتحدة وبريطانيا إلى أن الاستغلال التجارى للتفاعل الاندماجى قد يصبح مجديًا فى غضون من 25 إلى 50 عامًا .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 أن تُعرِّف (أ) النوية ، (ب) وحدة الكتل الذرية ، (جـ) العدد الذرى وعدد الكتلة ، (د) النظير ، (هـ) الوفرة الطبيعية ، (و) طاقة الربط النووية ، (ز) اضمحلال النشاط الإشعاعى ، (ح) الفاعلية ، (ط) ثابت الاضمحلال ، (ى) عمر النصف ، (ك) اضمحلال ألفا α واضمحلال بيتا β ، (ل) نسبة التفرع ، (م) الجرعة ، (ن) الجرعة المكافئة حيويًا ، (س) وحدات البيكريل ، والكورى ، والجراى ، والسيفرت ، (ع) الانشطار النووى ، (ف) الاندماج النووى ، (ص) التفاعل المتسلسل ، (ق) قضبان الوقود ، (ر) قضبان التحكم ، (ش) المهدئ ، (ت) شظية الانشطار ، (ث) تفاعل التوليد ، (خ) نسبة التوليد .

2 أن تقدر حجم نواة ما إذا عرفت عدد الكتلة لها .

3 أن ترسم بيانيًا العلاقة بين طاقة الربط لكل نوية وعدد الكتلة A .

4 أن تحسب طاقة ربط النواة إذا عرفت كتلتها .

5 أن ترسم بيانيًا العلاقة بين N و t بالنسبة لمادة ذات نشاط إشعاعى وإذا علمت عمر النصف أو ثابت الاضمحلال لمادة ما فى العينة ، أن تحسب كسر العينة الأصلية الذى تبقى بعد فترة زمنية معينة .

6 أن تكتب معادلة التفاعل النووى بالنسبة لنواة معينة يحدث لها اضمحلال α واضمحلال β . وإذا علمت كتل النوى الابتدائى والنهائى أن تعين أيها سيتم تلقائيًا (إذا تم فى الأصل) .

7 أن تعد رسمًا بيانيًا مثل الذى فى الشكل 8–28 لسلسلة إذا علمت النواة الابتدائية والجسيمات المنبعثة منها .

8 أن تقارن بين المدى والآثار التأيينية لإشعاعات α ، β ، γ عند اختراقها للمادة .

9 أن تفسر ـ بالرجوع إلى الرسم البيانى الخاص بطاقة الربط النووية ـ السبب فى أن التفاعل الانشطارى لليورانيوم لابد وأن يطلق طاقة . وأن تذكر ما المقصود بتفاعل انشطارى متسلسل وتربط هذا بسبب اختيار ${}^{235}U$ لتصنيع القنبلة .

10 أن ترسم تخطيطيًا مفاعلاً انشطاريًا مبينًا قضبان الوقود ، وقضبان التحكم والمهدئ والمبادل الحرارى والتوربين مع شرح وظيفة كل منها . أن تشرح أهمية إثراء الوقود .

11 أن تشرح تفاعل التوليد الذى يصنع من خلاله البلوتونيوم من اليورانيوم ، وتشرح كيف يختلف انشطار البلوتونيوم عن انشطار ^{235}U

12 أن تشرح مصدر الطاقة الحرارية التى تبقى فى المفاعل الانشطارى حتى بعد إنهاء التفاعلات الانشطارية بواسطة قضبان التحكم . أن تشرح خطورة هذه الحرارة .

13 أن تفسر ، بالرجوع إلى الرسم البيانى لطاقة الربط النووية ، السبب فى أن الاندماج النووى للهيدروجين لابد أن يتسبب فى إطلاق طاقة . وأن تذكر سبب صعوبة تنفيذ الاندماج فى المعمل مقارنًا بالانشطار . أن تذكر بعض الفوائد الممكنة للاندماج كمصدر للطاقة إذا قورن بالانشطار .

ملخص

كميات مشتقة وثوابت فيزيائية

وحدة الكتل الذرية (u)

$1\ u = \frac{1}{12}$ من كتلة ذرة الكربون $^{12}C = 1.660566 \times 10^{-27}\ kg$

الفاعلية

1 becquerel (Bq) = 1 decay/s ، 1 curie (Ci) = 3.7×10^{10} Bq

الجرعة الممتصة

1 gray (Gy) = 1 J/kg ، 1 rad = 0.010 Gy

الجرعة المكافئة بيولوجيًا (حيويًا)

1 sievert (Sv) = 1 Gy × RBE ، حيث RBE هى الفاعلية الحيوية النسبية لنوع الإشعاع الممتص . 1 rem = 0.010 Sv

تعريفات ومبادئ أساسية :

الرموز الخاصة بالنظائر

بالنسبة لنواة معينة فإن ،

Z = عدد البروتونات (العدد الذرى) ، N = عدد النيوترونات ، $A = Z + N$ = عدد النويات (عدد الكتلة) .

خلاصة :

1 ينتمى كل النوى الذى له نفس العدد الذرى Z إلى نفس العنصر الكيميائى .

2 يعتبر النوى الذى له نفس Z وله N مختلفة (ومن ثم A مختلفة) من نظائر العنصر الكيميائى .

3 يرمز لنظير عنصر ما X بالرمز $^{A}_{Z}X$.

4 العناصر الموجودة فى الطبيعة هى خليط من نظائر متعددة . والوفرة النظائرية الطبيعية هى النسبة المئوية لمختلف النظائر التى تكون العنصر .

الحجم والكثافة النوويين

نصف قطر نواة عدد كتلتها A هو بالتقريب : $R = (1.2 \times 10^{-15}\ m)\, A^{1/3}$.

خلاصة :

يقتضى اعتماد R على A أن يتناسب الحجم النووى مع A ، ومن ثم يكون لجميع النوى نفس كثافة الكتلة تقريبًا .

قوة وطاقة الربط النووى

لقوة الربط النووى الخصائص المميزة التالية :

1 لـها مدى قصير للغاية ، وتصبح صفرًا إذا زادت المسافة بين النويات عن نحو 5×10^{-15} m .

2 قوية للغاية وهى قادرة فى مدى تأثيرها أن تمسك بالنيوترونات معًا ، متغلبة بذلك على التنافر القوى جدًا بين شحنات البروتونات .

3 تنطبق بنفس القدر على البروتونات والنيوترونات ولا تأثير لـها مطلقا على الإلكترونات ، ولذلك لا وجود للإلكترونات داخل النواة .

وطاقة ربط النواة هى الطاقة اللازمة لفصل النواة إلى مكوناتها من البروتونـات والنيوترونـات . فـإذا كـان الفرق بـين الكتلة الكلية للنويات المنفصلة وكتلة النواة مجتمعة هو النقص الكتلى Δm ، فإن طاقة الربط تكون ،

$$\text{طاقة الربط} = \Delta mc^2$$

النشاط الإشعاعى

هو العملية التى تتخلص فيها النواة غير المستقرة من الطاقة الزائدة بإطلاق جسيمات وإشعـاع كهرومغناطيسى . ومـن الإشعـاع المألوف ، جسيمات α (نوى ^{4}He) وجسيمات β (إلكترونات) ، وأشعة جاما γ .

عمر النصف ($T_{1/2}$)

تضمحل المادة المشعة أسيًا ، وهو ما يتميز إحصائيًا بفترة زمنية تمر خلالـها نصف كمية المادة التى وجـدت فـى البدايـة بتغير إشعاعى . وهذه الفترة الزمنية التى تتباين فى مدى واسع من نظير إلى آخر ، هى ما يسمى عمر النصف للنظير .

ثابت الاضمحلال (λ)

هناك وصف بديل للاضمحلال الإشعاعى ، يعطى بالمعادلة التحليلية التالية : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

حيث N_0 هو العدد الأصلى للنوى فى العينة ، و $N(t)$ هو العدد المتبقى عبر الزمن t و λ هو ثابت الاضمحلال للنظير . ويرتبط λ بعمر النصف بالمعادلة :

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

فاعلية عينة ما

هى معدل حدوث اضمحلالات إشعاعية لعينة ما ، أى عدد الاضمحلالات فى الثانية .

$$\text{الفاعلية} = \lambda N(t)$$

التفاعلات النووية

عندما تدخل النوى فى تفاعل يغير من تركيبها ، فإن تلك التغيرات لابد أن تتبع قوانين الفيزياء للبقاء :

1 يجب أن تظل الشحنة الكلية على جميع الجسيمات قبل وبعد التفاعل ثابتة .

2 يجب أن يظل العدد الكلى للنويات قبل وبعد التفاعل ثابتًا .

3 يستوجب بقاء الطاقة أن يكون الفرق فى الكتل الكلية قبل وبعد التفاعل مرتبطًا بالطاقة التى امتصت أو أطلقت بالعلاقة :

$$\text{الطاقة الممتصة أو المنطلقة} = \Delta m\ c^2$$

خلاصة

1 إذا كانت $\Delta m < 0$ فإن طاقة تنطلق ، والنوى الناتج من التفاعل ستكون طاقته أقل واستقراره أكبر . ويمكن لـهذا التفاعل أن

يتم تلقائيًا ، تمامًا كما يحدث فى النشاط الإشعاعى .

2 أما إذا كانت $\Delta m > 0$ فإن الطاقة يجب أن تتوفر حتى يتم التفاعل . وهذا النوع من التفاعل لا يمكن أن يحدث تلقائيًا .

الانشطار النووى

تنشطر النواة فى هذه العملية إلى شظيتين رئيستين لهما حجم واحد تقريبًا مع إطلاق قدر من الطاقة . ويتحول نحو 1% من الكتلة الأصلية إلى طاقة فى عملية الانشطار . وهناك عدد قليل من النظائر الثقيلة التى لديها احتمال ملموس للانشطار عندما يتم قصفها بالنيوترونات . ومن أبرز تلك النظائر $^{235}_{94}U$ و $^{239}_{94}Pu$. وعند حدوث الانشطار ينطلق نيوترونان أو أكثر وهذا يتيح معامل مضاعفة النيوترونات الجاهزة لبدء عمليات انشطار جديدة ، وبذلك يحدث تفاعل متسلسل ، مما يجعل معدل الانشطار فى نمو أسّى .

الاندماج النووى

يمكن تحت ظروف معينة دمج أو صهر النوى الخفيف معًا ليتكون نوى أثقل ، ويصحب ذلك انطلاق الطاقة . وهذه العملية تسمى اندماجًا نوويًا . وعادة ما يتحول نحو 8% تقريبًا من الكتلة الأصلية إلى طاقة فى هذه العملية .

أسئلة وتخمينات

1 يستخدم الكوبالت 60 على نطاق واسع كمصدر لأشعة جاما المستخدمة فى العلاج الإشعاعى للسرطان . ما هو عدد البروتونات والنيوترونات والإلكترونات التى تحتويها ذرة $^{60}_{27}Co$ واحدة ؟

2 لماذا يعتبر الكيميائيون أن النظائر تمثل نفس العنصر حتى ولو لم تكن أنويتها هى نفسها ؟

3 هل للأطياف البصرية لكل من ذرات ^{235}U و ^{238}U أن تبدى اختلافًا بأى شكل جوهرى ؟

4 قدر الكتلة الذرية للنظير $^{64}_{30}Z$ إذا علمت أن طاقة الربط للنوية نحو 8.7 MeV .

5 التريتيوم هو النظير ^{3}H للهيدروجين وكتلته الذرية هى 3.016 u بينما تبلغ الكتلة الذرية للهيدروجين ^{1}H 1.0078 u وللنيوترون 1.00867 u . ما الذى تتوقعه بالنسبة لاستقرار التريتيوم ؟ كرر السؤال بالنسبة للنظير ^{2}H الذى تبلغ كتلته الذرية 2.0141 u .

6 يضمحل فلز ما إلى عنصر مستقر وذلك بإطلاق جسيمات ألفا التى تبلغ طاقاتها نحو 9 MeV . وقد ثبتت كرة صغيرة من الفلز النقى عند طرف دبوس . صف الطريقة التى يمكنك بها معرفة عمر النصف للفلز إذا كان ذلك العمر نحو (أ) خمسة أيام و (ب) 2000 سنة .

7 تم امتصاص حزمة من جسيمات ألفا فى كتلة من الرصاص . ماذا يحدث لتلك الجسيمات ؟ لقد أثبت رذرفورد طبيعة جسيمات α عندما قام بتسخين الرصاص المشع .

8 يعتبر غاز الرادون المشع من الملوثات الخطيرة للهواء . وحيث أن الرادون يتسرب إلى داخل المنازل من الأرض تحتها ، فما هى العوامل المؤدية إلى مستويات الرادون الخطيرة ؟

9 ما هو مصدر غاز الهليوم على وجه الأرض ؟

10 من الممكن لقطعة من اليورانيوم 235 أصغر من الكتلة الحرجة أن تنفجر إذا وضعت داخل وعاء كبير مملوء بالماء . فسر السبب . ولماذا لا ينفجر ^{235}U إذا كان على هيئة سلك ، حتى لو كانت كتلة السلك أكبر من الكتلة الحرجة ؟

11 يشعر معظم أطباء الإشعاع أن النساء اللاتى تخطين سن الإنجاب ، بإمكانهن التعرض بأمان لكمية من أشعة إكس أكثر من التى تتعرض النساء الصغيرات لها . فكيف يمكنهم تبرير هذا الرأى ؟

12 قد يحدث أن شخصًا يعمل فى مجال أشعة إكس أن يحرق يده بدرجة كبيرة ويصبح لزامًا عليه أن تبتر تلك اليد ، ثم لا يعانى بعد ذلك من أية آثار جانبية . ومع ذلك ، فإن التعرض لجرعة زائدة من أشعة إكس التى قد لا تسبب أضرار محسوسة لجسده ولكنها قادرة على تشويه من ينجبهم من الأطفال بشكل خطير . اشرح السبب .

مسائل

الأقسام من 1–28 إلى 3–28

1 أوجد الكميات الآتية للنواة $^{14}_{7}N$: (أ) الشحنة النووية ، (ب) عدد النيترونات ، (جـ) نصف قطرها بالتقريب ، (د) الكثافة النووية .

2 أوجد الخواص التالية للنواة $^{202}_{80}Hg$: (أ) عدد البروتونات ، (ب) عدد النيوترونات ، (جـ) نصف قطرها بالتقريب ، (د) الكثافة النوية .

3 لنظير نووى معين عدد كتلة مقداره 43 ، وعدد نيوتروناته أزيد بثلاثة عن عدد البروتونات . حدد ما هو النظير .

4 لنظير معين 10 نيوترونات وعدد الكتلة الذرى له 18 . فأى نظير هو ؟

5 ما هى النواة المستقرة التى يبلغ نصف قطرها التقريبى نصف $(\frac{1}{2})$ نصف قطر النواة $^{216}_{84}Po$ ؟

6 قارن بين أنصاف الأقطار النووية والكثافات النووية لكل من النويدات الآتية : $^{7}_{3}Li$ ، $^{93}_{41}Nb$ ، $^{220}_{86}Rn$.

▪ 7 تعتبر الأرض كرة تقريبًا ، نصف قطرها 6.4×10^{6} m ، ومتوسط كثافتها 5320 kg/m³ . لو تخيلت أن الأرض انكمشت فصارت كرة لها نفس كثافة النواة ($\approx 2 \times 10^{17}$ kg/m³) ، فكم سيكون نصف قطرها عندئذ ؟

▪ 8 لقد تم تقدير كتلة الكون المشاهد على أنها من الرتبة 10^{51} kg . وإذا افترضنا أن هذه الكتلة ضغطت فى كرة لها كثافة النواة ($\approx 2 \times 10^{17}$ kg/m³) . فكم سيكون نصف قطر تلك الكرة ؟ قارن هذا مع نصف قطر الشمس 7×10^{8} m .

9 يستخدم منتقى السرعات في جهاز مطياف الكتلة (الفصل التاسع عشر) للحصول على حزمة من الأيونات التى سرعتها 2.9×10^{5} m/s . أوجد نصف قطر المسار الذى يتبعه أيون ^{12}C أحادى التأين عندما تكون شدة المجال المغناطيسى B داخل المطياف $0.080\ T$.

10 ما هو الفرق بين نصفى قطر مسارى النظيرين ^{12}C و ^{14}C فى مطياف الكتلة الوارد فى المسألة رقم 9 ؟

11 يستخدم فى مطياف كتلة معين (الفصل التاسع عشر) فرق جهد مقداره 1700 V لتعجيل الأيونات ، ثم يتم حرفها فى مجال مغناطيسى شدته $0.070\ T$. تتبع حزمة من أيونات أحادية التأين مسارًا نصف قطره 12.0 cm فى المطياف . ما هى كتلة هذه الأيونات بالكيلو جرام وبوحدات الكتل الذرية ؟

▪ 12 فحصت حزمة من خليط أيونات أحادية التأين لنظيرين فى مطياف كتلة ، فوجد أن نصفى قطر المسارين الدائريين اللذين تتبعهما الأيونات هما 12.0 cm و 14.0 cm ، على الترتيب . أوجد النسبة بين الكتلتين الذريتين للنظيرين .

▪ 13 بلغ نصف قطر المسار الذى يتبعه أيون ^{12}C أحادى التأين 10.0 cm فى مطياف الكتلة . كم يكون نصف القطر لأيون الأكسجين ^{16}O ؟ (افترض أن شحنتى الأيونين وجهدى التعجيل متشابهة) .

14 يحتوى عنصر الكلور الموجود فى الطبيعة على نظيرين فقط . يكوّن أحد النظيرين $^{35}_{17}Cl$ نحو 75.5% ويكون الثانى $^{37}_{17}Cl$ نحو 24.5% . أوجد الكتلة الذرية لعينة طبيعية من الكلور إلى ثلاثة أرقام معنوية .

15 يتواجد البوتاسيوم الطبيعى كخليط من نظيرين : أحدهما ذو كتلة ذرية 38.964 u ووفرته النسبة 93.3% ، أما الثانى فكتلته الذرية 40.975 u ويمثل 6.7% . احسب الكتلة الذرية لعينة طبيعية من البوتاسيوم .

16 لقد وجد أن النيون متواجد في الطبيعة على هيئة نظائر ثلاثة . فالنظير ^{20}Ne وفرته النسبية 90.9% ، والنظير ^{21}Ne وفرته النسبية 0.3% أما النظير ^{22}Ne فوفرته النسبية 8.8% . قدر الكتلة الذرية للنيون كما وردت في الجدول الدوري للعناصر .

■ 17 يتكون اليورانيوم الموجود على الأرض من نظيرين أساسيين هما ^{235}U و ^{238}U . وتبلغ الكتلتان الذريتان لهما 235.044 u و 238.051 u على الترتيب ، في حين أن كتلة العينة الطبيعية هي 238.030 u . أوجد النسبة المئوية التقريبية لكل نظير في عينة طبيعية من اليورانيوم .

■ 18 للكربون الطبيعي نظيران أساسيان هما ^{12}C ؛ كتلته الذرية 12.00000 u ووفرته النسبية 98.892 u . ما هي الكتلة الذرية للنظير الآخر إذا كانت كتلة الكربون الطبيعي هي 12.01115 u ؟

القسم 4-28

19 استعن بالبيانات الموضحة في الشكل 3-28 لتعرف مقدار ما يفقد من الكتلة عند تكوين نواة الزنك 64 من بروتونات ونيوترونات حرة ، ما هي النسبة المئوية لفقد الكتلة ؟

20 احسب من بيانات الشكل 3-28 مقدار الطاقة المطلوب لتمزيق نواة الزئبق 202 إلى بروتونات ونيوترونات حرة . ما هو المكافئ الكتلي (بوحدات u) لهذه الطاقة ؟

21 احسب طاقة الربط الكلية لنواة الكربون 12 ؛ ما مقدار طاقة الربط لكل نوية ؟ **تلميح** : تذكر أن كتلة ذرة الكربون 12 هي 12 u تمامًا .

22 احسب طاقة الربط الكلية وطاقة الربط لكل نوية لنواة ^{40}Ca . والكتلة الذرية لهذه النواة هي 39.96259 u .

23 الكتلة الذرية لنواة ^{14}N هي 14.00307 u ، ولنواة ^{15}N ، 15.00011 u . مستخدمًا هذه البيانات ، احسب طاقة الربط للنيوترون الزائد في نواة ^{15}N .

24 استخدم بيانات 3-28 ، وقيم كتلتي البروتون والنيوترون لإيجاد كتلة ذرة كريبتون 84 .

25 إذا كان لنظيرين نفس عدد الكتلة مع اختلاف عدديهما الذريين ، فإنهما يسميان **أيزوباران** . احسب الفرق في طاقة الربط لكل نوية بالنسبة لكل من الأيزوبارين $^{36}_{16}S$ و $^{36}_{18}A$. كيف تفسر اختلاف قيمتي طاقة الربط ؟

■ 26 ما مقدار الطاقة اللازم لإزالة نيوترون من نواة النظير ^{13}C ؟ وما هو النظير الذي ينتج بعد هذه الإزالة ؟

القسمان 5-28 و 6-28

27 سجل عداد جايجر مثبت فوق عينة مشعة 678 عدّة في الدقيقة . فكم عدّة سيسجلها بعد انقضاء أربعة أعمار نصف لهذه المادة .

28 سجلت عينة مشعة 840 عدّة في الدقيقة في لحظة ما ؛ وبعد مرور 48 h سجلت 44 عدّة في الدقيقة . ما هو عمر النصف لهذه العينة ؟

29 تحتوي مادة مشعة على 4.5×10^{12} نواة ؛ عمر النصف لها 0.84 yr . (أ) ما هو ثابت اضمحلال هذه المادة ؟ (ب) كم عدد النوى الذي يضمحل في العينة الأصلية في دقيقتين ؟

30 عمر نصف البولونيوم 140 d . كم تستغرق عينة من البولونيوم لكي تضمحل إلى ثمن $(\frac{1}{8})$ الكمية الأصلية ؟

31 تحتوي كبسولة صغيرة من غاز الرادون على 8.0×10^{12} ذرة . وعمر النصف للرادون 3.8 d . ما عدد التفتتات التي تحدث في الكبسولة كل دقيقة ؟

32 بعض الساعات تنير أرقامها في الظلام ، وذلك لأن تلك الأرقام تطلى أحيانًا بدهان به مادة مشعة . وقد سجل طالب باستخدام عداد جايجر أن 750 تفتت يحدث في الثانية . فإذا كانت أرقام الطالب صحيحة . ما عدد وحدات الكوري من النشاط الإشعاعي توجد في أرقام الساعة ؟

33 يسجل عداد جايجر مثبت فوق قطعة ضئيلة من صخرة مشعة 194 عدّة في الدقيقة . إذا افترضنا أن العداد يستقبل أشعة من نصف عدد النوى المضمحل فقط ، فما هي فاعلية الصخرة ؟

34 عمر النصف للتريتيوم وهو نظير مشع للهيدروجين 12.33 yr . ما هي النسبة المئوية للنوى الذي يتفتت في عينة من التريتيوم في 6 yr ؟

■ 35 لوحظ أن 2 mg من مادة مشعة نقية قد أصبحت 0.25 mg فقط بعد مرور 3 h . ما هو عمر نصف هذه المادة ؟

■ 36 ما هو كسر المادة المشعة الذي يضمحل في 90 yr إذا كان عمر نصف المادة 156 yr ؟

■ 37 أوضحت القياسات أن 14% فقط من مادة مشعة هو الذي يتبقى بعد مرور 24.0 h . ما هو عمر نصف هذه المادة ؟

■ 38 يعتبر عنصر الإسترونشيوم 90 من نواتج الانشطار المشعة في المفاعلات والقنابل النووية . وحيث أن عمر النصف له طويل جدًا (نحو 28 yr أو 8.8×10^8 s) ، فإنه من الملوثات التي تدوم وتمثل مشكلة خطيرة عند التخلص منها . ما هو كسر الإسترنشيوم الأصلي ، الذي يتبقى بعد مرور مائة عام على انفجار قنبلة نووية ؟

■■ 39 عمر النصف لليورانيوم ^{238}U هو 4.5×10^9 yr . احسب فاعلية 0.1 g من عينة من اليورانيوم النقي .

الأقسام من 7–28 إلى 9–28

40 ما هي النوى التي يرمز لها بالرمز X في الاضمحلالات المشعة التالية :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow X + ^{4}_{2}He \quad , \quad ^{95}_{36}Kr \rightarrow X + ^{0}_{-1}e \quad , \quad ^{59}_{26}Fe \rightarrow X + \gamma$$

41 أكمل معادلات الاضمحلال الإشعاعي التالية وذلك بتحديد العنصر X :

$$^{233}_{91}Pa \rightarrow X + ^{0}_{-1}e \quad , \quad ^{234}_{90}Th \rightarrow ^{230}_{88}Ra + X \quad , \quad X \rightarrow ^{140}_{58}Ce + ^{4}_{2}He$$

42 ما هو النظير الذي ينتج بعد أن يضمحل النظير $^{210}_{84}Po$ وذلك بإطلاق جسيم α طاقته 5.3 MeV وشعاع γ طاقته 0.80 MeV ؟

43 حدد النظير الناتج عندما يضمحل $^{209}_{82}Pb$ بإطلاق جسيم β . وكرر بالنسبة للنظير $^{223}_{86}Rn$ الذي يطلق هو الآخر جسيم β .

44 ما هو النظير الناتج عندما يضمحل $^{211}_{83}Bi$ بانبعاث جسيم α طاقته 6.62 MeV ؟

45 يشع $^{220}_{86}Rn$ شعاع γ طاقته 0.54 MeV . ما هي النسبة المئوية التي تتغير بها الكتلة النووية في هذه العملية ؟

46 ما هو التغير النسبي في الكتلة النووية للنظير $^{226}_{90}Th$ عندما يطلق شعاع جاما طاقته 1.11 MeV ؟

■ 47 ما هو النظير الذي ينتج من اضمحلال $^{234}_{92}U$ الذي يطلق جسيم α ؟ والطاقة التي تتحرر في هذا الاضمحلال هي 4.773 MeV . احسب كتلة النويدة الوليدة .

48 ما هو الجسيم الذي ينطلق عندما يضمحل $^{14}_{6}C$ إلى $^{14}_{7}N$ ؟

■ 49 يضمحل اليورانيوم 238 بإطلاق جسيم α بعمر نصف مقداره 4.5×10^9 yr طبقًا للمعادلة :

$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He +$ طاقة فإذا أصبحت الطاقة كلها طاقة حركة لجسيم α ، فما مقدار طاقتها بوحدات MeV ؟ إن طاقتها الفعلية هي 4.19 MeV . فكيف تفسر هذا التناقض ؟ اعتبر أن كتل النظائر المشتركة في التفاعل هي $M(^{238}_{92}U) = 238.05077$ u ، $M(^{234}_{90}Th) = 234.04358$ u و $M(^{4}_{2}He) = 4.00260$ u .

■ 50 أي هذه الاضمحلالات التالية يحدث تلقائيًا (طبق اعتبارات الطاقة) ؟

$$^{11}_{5}B \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He \quad , \quad ^{144}_{60}Nd \rightarrow ^{140}_{58}Ce + ^{4}_{2}He$$

■ 51 افترض أن لديك التفاعل التالى : $^{1}_{1}H + ^{13}_{6}C \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$ حيث n هو النيوترون . هل يمكن بدء هذا التفاعل بواسطة بروتون ، طاقة حركته 2.2 MeV ؟ اعتبر الكتل الذرية للنوى المشترك فى الفاعل كالآتى : $M(^{1}_{1}H) = 1.007825\ u$ ، $M(^{7}_{3}Li) = 7.01600\ u$ ، $M(^{7}_{4}Be) = 7.01693\ u$ ، $M(^{1}_{0}n) = 1.008665\ u$.

■ 52 استنادًا إلى اعتبارات الطاقة ، هل التفاعلات التالية ممكنة ، مع العلم بأن طاقة حركة البروتون الساقط 1.6 MeV ؟ $^{1}_{1}H + ^{7}_{3}Li \rightarrow ^{7}_{4}Be + ^{1}_{0}n$ واعتبر الكتل الذرية للنوى المشترك فى التفاعل كالتالى : $M(^{1}_{1}H) = 1.007825\ u$ $M(^{1}_{0}n) = 1.008445\ u$ ، $M(^{7}_{3}Li) = 7.01600\ u$ ، $M(^{7}_{4}Be) = 7.01693\ u$.

■ 53 هب أن لديك التفاعل التالى : $^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{7}_{4}Be + ^{1}_{0}n$ وكانت الكتل الذرية للنوى المشترك فى التفاعل كالتالى : $M(^{4}_{2}He) = 4.00260\ u$ ، $M(^{1}_{0}n) = 1.008665\ u$ ، $M(^{271}_{13}Al) = 26.98154\ u$ ، $M(^{30}_{15}P) = 29.97831\ u$ فهل هذا التفاعل ممكن ، علمًا بأن طاقة حركة $^{4}_{2}He$ هى 2.0 MeV ؟

■ 54 يضمحل نظير البولونيوم 210 بإطلاق شعاع جاما طاقته 0.080 MeV ، ومعه جسيم الفا ، طاقة حركته 5.3 MeV من خلال التفاعل : $^{210}_{84}Po \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{206}_{83}Pb + \gamma$ وكانت كتل النوى الناتج هى : $M(^{4}_{2}He) = 4.00260\ u$ ، $M(^{206}_{82}Pb) = 205.97447\ u$. (أ) فإذا علمت أن قيمة طاقة حركة جسيم α هى 5.3 MeV ، فما هى طاقة الارتداد لذرة الرصاص بالتقريب ؟ (ب) احسب الكتلة الذرية المتوقعة للبولونيوم 210 علمًا بأن الكتلة المقاسة هى 209.9829 u .

■■ 55 هب أن 1 kg من الديوتيريوم (الهيدروجين الثقيل $^{2}_{1}H$) قد اندمج ليكون 1 kg من الهليوم طبقًا للتفاعل الآتى : $^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He$ والكتل الذرية $M(^{2}_{1}H) = 2.0141\ u$ ، $M(^{4}_{2}He) = 4.00260\ u$. (أ) ما مقدار الطاقة المتحررة بالجول J ؟ (ب) إذا كان الهليوم المحصور ذا حرارة نوعية 0.75 cal/g.°C . فما مقدار ارتفاع درجة حرارته عند إضافة هذه الطاقة إليه ؟

■ 56 تبدأ سلسلة الثوريوم الواردة فى الجدول 1-28 بالعنصر $^{232}_{90}Th$ وتطلق على التوالى ، جسيم α واحد ، جسيمًا β واحد . تحقق من أن النظير الناتج فى النهاية هو نفس ما ورد فى الجدول .

■ 57 يمر اليورانيوم 238 الذى يقع فى سلسلة اليورانيوم الواردة فى الجدول 1-28 ، بخمس عمليات اضمحلال α . تحقق من النواة الوليدة الناتجة عقب كل عملية اضمحلال .

■ 58 تبدأ سلسلة الأكتينيوم الواردة فى الجدول 1-28 بالنواة $^{235}_{92}U$ وتطلق على تتابع جسيم α واحد ثم جسيم β واحد ، ثم جسيمًا α ، فواحد β ، فثلاثة γ ، فاثنان β ، وجسيم α واحد . ارسم شكلًا بيانيًا لهذه السلسلة وحدد النوى الوليد عقب كل عملية اضمحلال .

الأقسام من 10-28 إلى 15-28

■ 59 يستخدم نظير اليود 131 فى علاج اضطرابات الغدة الدرقية لأنه يتركز عند ابتلاعه فى الغدة الدرقية . وعمر النصف لهذا النظير 8.1 d . (أ) ما هى فاعلية 0.80 μg من ^{131}I ؟ (ب) ما هى كمية ^{131}I التى لها فاعلية مقدارها 0.2 μCi ؟

■ 60 عمر النصف لنظير الفوسفور 32 هو 14.3 d ويستخدم طبيًا لأنه يتركز فى العظام . ما هى فاعلية 0.7 g من ^{32}P ؟

■ 61 كم جرامًا من الحديد 59 فى عينة فاعليتها 1 mCi ؟ علمًا بأن عمر النصف له 46.3 d .

■ 62 يشترى أحد المعامل الطبية عينة من نظير مشع فاعليتها 260 mCi ، وعمر النصف لذلك النظير 180 d . ما المدة التى يمكن للمعمل استخدام هذه العينة فيها قبل أن تهبط فاعليتها إلى 26 mCi ؟

- 63 عمر نصف النظير تريتيوم $({}^3_1H)$ هو 4600 d . كم جرامًا من التريتيوم تحتوى عليها عينة فاعليتها 2.31 mCi ؟
- 64 ما مقدار الارتفاع فى درجة حرارة الماء إذا زود ذلك الماء بجرعة إشعاع مقدارها 10.0 mGy ؟
- 65 ما مقدار جرعة الإشعاع التى يجب أن تستقر فى الرصاص لكى ترفع درجة حرارته 8°C ؟ وحرارة الرصاص النوعية هى 0.031 cal/g.°C .
- 66 يتعرض عامل وزنه 70 kg فى معمل نووى إلى جرعة إشعاعية مقدارها 0.25 Gy . ما مقدار الطاقة بوحدات جول (J) التى تستقر فى جسد العامل ؟
- 67 فى محاولة لتأريخ قطعة من العظام ، وجد أن معدل العد من ${}^{14}C$ هو 0.048 فقط من العد الناتج من عينة حديثة من العظام . ما هو عمر قطعة العظام ؟ عمر النصف للنظير ${}^{14}C$ هو 5700 yr .
- 68 عمر النصف للثوريوم 232 هو 1.39×10^{10} yr ويضمحل خلال عدد من الخطوات إلى ${}^{208}Pb$. وكانت نسبة ${}^{208}Pb$ إلى ${}^{232}Th$ فى عينة من الصخور هى 0.17 . ما هو عمر الصخرة منذ أن تجمدت ؟
- 69 التريتيوم هو $({}^3_1H)$ أحد نظائر الهيدروجين وعمر النصف له 12.3 yr . ويتكون هذا النظير فى طبقات الجو العليا بواسطة الأشعة الكونية ويختلط جيدًا مع هيدروجين الهواء . ولكى نعين عمر زجاجة من النبيذ وجدت فى كهف قديم تم قياس التريتيوم فى النبيذ ووجد أنه يمثل 6.9% من التريتيوم الموجود فى عينة حديثة من النبيذ . ما هو عمر النبيذ الذى فى الزجاجة ؟

الأقسام من 28-16 إلى 28-18

- 70 هب أن لديك التفاعل الانشطارى الآتى : ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr$ احسب مقدار الطاقة المنطلقة فى هذا التفاعل . الكتل الذرية للنوى المشترك فى هذا التفاعل هى : $M({}^{235}U) = 235.04392$ u ، $M({}^1_0n) = 1.008665$ u ، $M({}^{144}Ba) = 143.92285$ u ، $M({}^{92}Kr) = 91.92627$ u .
- 71 (أ) إذا كانت عملية انشطار اليورانيوم ${}^{235}U$ مصحوبة بطاقة مقدارها 210 MeV ، فكم من الطاقة ينطلق عند انشطار 1 g من ${}^{235}U$ ؟ (ب) إذا كانت تكلفة الكيلووات ساعة من الطاقة 8 cents فما هى تكلفة الطاقة المحسوبة فى (أ) ؟
- 72 كم جرامًا تلزم من ${}^{235}U$ لتشغيل محطة قوى قدرتها 1500 MW لفترة ساعة واحدة إذا كانت الكفاءة الإجمالية للمفاعل 30% ؟ **تلميح** : اعتبر أن كل عملية انشطار يصحبها 210 MeV من الطاقة تقريبًا .
- 73 ينتج قلب المفاعل فى محطة قوى نووية نموذجية 3600 MW من القدرة الحرارية . فإذا كان ${}^{235}U$ فى قلب المفاعل ينخفض بمقدار 28% فى 6 yr فكم كانت كمية ${}^{235}U$ الموجودة فى القلب فى البداية ؟ اعتبر أن 210 MeV تقريبًا من الطاقة تنطلق مع كل عملية انشطار .
- 74 يصطدم نيوترون سرعته 4×10^6 m/s بذرة ديوتيريوم ساكنة $({}^2_1H)$ اصطدامًا مباشرًا مرنًا . (أ) ما هى سرعة النيوترون بعد التصادم ؟ (ب) أعد المسألة إذا حلت ذرة أكسجين ${}^{16}_{8}O$ محل ذرة الديوتيريوم . لاحظ أن النوى الذى كتلته صغيرة يكون أكثر فاعلية فى إبطاء النيوترونات.
- 75 يكون إبطاء النيوترونات أكثر ما يمكن فاعلية عند التصادم مع جسيمات لها نفس الكتلة . افترض أن نيوترونًا سرعته 10^7 m/s يصطدم اصطدامًا مباشرًا مع بروتون حر ساكن . ما هى السرعة النهائية للنيوترون ؟ أعد المسألة إذا كان النيوترون سيصطدم اصطدامًا مرنًا مع ذرة ذهب حرة ساكنة .

■■ 76 من التفاعلات الممكنة التي يمكن أن يعمل على أساسها مفاعل الاندماجي : $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$ حيث $^{3}_{1}H$ هو التريتيوم . كم جرامًا من الديوتيريوم والتريتيوم ستندمج كل ثانية لإنتاج قدرة تصل إلى 1000 MW ؟ مع العلم بأن الكتل الموثوق بها هي $M(^{2}H) = 2.014102$ u ، $M(^{3}H) = 3.016050$ u ، $M(^{4}He) = 4.0026044$ u .

■■ 77 أوجد الطاقة المتحررة في التفاعلات الاندماجية التالية :

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{1}_{1}H \quad ، \quad ^{2}_{1}H + ^{3}_{2}He \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{1}H$$

مسائل عامة

■■ 78 عمر النصف لنظير الكوبالت ^{60}Co هو 5.3 yr (أ) ما عدد الذرات الموجودة في 1 gm من عينة من ^{60}Co ؟ ما هو ثابت اضمحلال هذه المادة ؟ (جـ) كم عدد عمليات الاضمحلال التي تحدث كل ثانية في 1 g من المادة ؟

■■ 79 عينة ما تحتوي على N_1 نواة من مادة عمر النصف لها هو $(T_{1/2})$ و N_2 نواة من مادة أخرى عمر النصف لها $(T_{1/2})_2$. ما هو عمر النصف الفعال للعينة بدلالة $(T_{1/2})_2$ ، $(T_{1/2})_1$ ، N_1 ، N_2 ؟ اعتبر أن عمري النصف أطول بكثير من زمن المشاهدة .

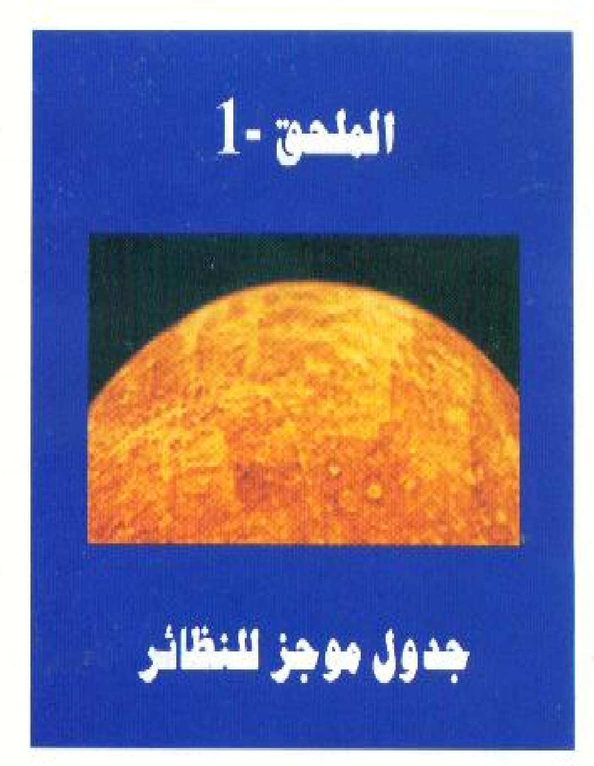
■■ 80 ذكرنا في القسم 16-28 أن إحدى العمليات الممكنة لانشطار النواة المركبة ^{236}U هي

$$^{236}U \rightarrow ^{140}_{56}Ba + ^{92}_{26}Kr + 4^{1}_{0}n + \text{طاقة}$$

ثم تضمحل النظائر الناتجة على امتداد عدة خطوات بإطلاق جسيمات β . ويمكن كتابة هذه العمليات كما يلي :

$$^{140}_{56}Ba \rightarrow ^{140}_{58}Ce + 2\beta + \text{طاقة} \quad ، \quad ^{92}_{36}Kr \rightarrow ^{92}_{40}Zr + 4\beta + \text{طاقة}$$

أوجد الطاقة الإجمالية المتحررة عند انشطار نواة ^{235}U بهذه الطريقة . الكتل الذرية للنوى المشترك في هذه العملية هي : $N(^{235}U) = 235.04392$ u ، $M(^{140}Ce) = 139.90539$ u ، $M(^{92}Zr) = 91.90503$ u .



أساس القيم الواردة بالجدول هو نظير الكربون $^{12}_{6}C = 12\ u$ تمامًا ، والكتل الإلكترونية مأخوذة فى الاعتبار .

* لم تدرج الكتل الذرية للعناصر غير المستقرة ما لم يكن النظير المعنى هو النظير الرئيسى للعنصر .

العدد الذرى Z	الرمز	الكتلة الذرية المتوسطة	العنصر	عدد الكتلة A	الوفرة النسبية ٪	كتلة النظير
0	n	1.008665	Neutron	1		
1	H	1.00797	Hydrogen	1	99.985	1.007825
				2	0.015	2.014102
2	He	4.0026	Helium	3	0.00015	3.016030
				4	100	4.002604
3	Li	6.939	Lithium	6	7.52	6.015126
				7	92.48	7.016005
4	Be	9.0122	Beryllium	9	100	9.012186
5	B	10.811	Boron	10	19.78	10.012939
				11	80.22	11.009305
6	C	12.01115	Carbon	12	98.892	12.0000000
				13	1.108	13.003354
7	N	14.0067	Nitrogen	14	99.635	14.003074
				15	0.365	15.000108
8	O			16	99.759	15.994915
		15.9994	Oxygen	17	0.037	16.999133
				18	0.204	17.999160
9	F	18.9984	Fluorine	19	100	18.998405
10	Ne	20.183	Neon	20	90.92	19.992440
				22	8.82	21.991384
11	Na	22.9898	Sodium	23	100	22.989773

العدد الذرى Z	الرمز	الكتلة الذرية المتوسطة	العنصر	عدد الكتلة A	الوفرة النسبية %	كتلة النظير
12	Mg	24.312	Magnesium	24	78.60	23.985045
13	Al	26.9815	Aluminum	27	100	26.981535
14	Si	28.086	Silicon	28	92.27	27.976927
				30	3.05	29.973761
15	P	30.9738	Phosphorus	31	100	30.973763
16	S	32.064	Sulfur	32	95.018	31.972074
17	Cl	35.453	Chlorine	35	75.4	34.968854
				37	24.6	36.965896
18	Ar	39.948	Argon	40	99.6	39.962384
19	K	39.102	Potassium	39	93.08	38.963714
20	Ca	40.08	Calcium	40	96.97	39.962589
21	Sc	44.956	Scandium	45	100	44.955919
22	Ti	47.90	Titanium	48	73.45	47.947948
23	V	50.942	Vanadium	51	99.76	50.943978
24	Cr	51.996	Chromium	52	83.76	51.940514
25	Mn	54.9380	Manganese	55	100	54.938054
26	Fe	55.847	Iron	56	91.68	55.934932
27	Co	58.9332	Cobalt	59	100	58.93319
28	Ni	58.71	Nickel	58	67.7	57.93534
				60	26.23	59.93032
29	Cu	63.54	Copper	63	69.1	62.92959
30	Zn	65.37	Zinc	64	48.89	63.92914
31	Ga	69.72	Gallium	69	60.2	68.92568
32	Ge	72.59	Germanium	74	36.74	73.92115
33	As	74.9216	Arsenic	75	100	74.92158
34	Se	78.96	Selenium	80	49.82	79.91651
35	Br	79.909	Bromine	79	50.52	78.91835
36	Kr	83.30	Krypton	84	56.90	83.91150
37	Rb	85.47	Rubidium	85	72.15	84.91171
38	Sr	87.62	Strontium	88	82.56	87.90561
39	Y	88.905	Yttrium	89	100	88.90543
40	Zr	91.22	Zirconium	90	51.46	89.90432
41	Nb	92.906	Niobium	93	100	92.90602
42	Mo	95.94	Molybdenum	98	23.75	97.90551
43	Tc	*	Technetium	98		97.90730
44	Ru	101.07	Ruthenium	102	31.3	101.90372
45	Rh	102.905	Rhodium	103	100	102.90480
46	Pd	106.4	Palladium	106	27.2	105.90320

العدد الذرى Z	الرمز	الكتلة الذرية المتوسطة	العنصر	عدد الكتلة A	الوفرة النسبية %	كتلة النظير
47	Ag	107.870	Silver	107	51.35	106.90497
48	Cd	112.40	Cadmium	114	28.8	113.90357
49	In	114.82	Indium	115	95.7	114.90407
50	Sn	118.69	Tin	120	32.97	119.90213
51	Sb	121.75	Antimony	121	57.25	120.90375
52	Te	127.60	Tellurium	130	34.49	129.90670
53	I	126.9044	Iodine	127	100	126.90435
54	Xe	131.30	Xenon	132	26.89	131.90416
55	Cs	132.905	Cesium	133	100	132.90509
56	Ba	137.34	Barium	138	71.66	137.90501
57	La	138.91	Lanthanum	139	99.911	138.90606
58	Ce	140.12	Cerium	140	88.48	139.90528
59	Pr	140.907	Praseodymium	141	100	140.90739
60	Nd	144.24	Neodymium	144	23.85	143.90998
61	Pm	*	Promethium	145		144.91231
62	Sm	150.35	Samarium	152	26.63	151.91949
63	Eu	151.96	Europlum	153	52.23	152.92086
64	Gd	157.25	Gadolinium	158	24.87	157.92410
65	Tb	158.924	Terbium	159	100	158.92495
66	Dy	162.50	Dysprosium	164	28.18	163.92883
67	Ho	164.930	Holmium	165	100	164.93030
68	Er	167.26	Erbium	166	33.44	165.93040
69	Tm	168.934	Thulium	169	100	168.93435
70	Yb	173.04	Ytterbium	174	31.84	173.93902
71	Lu	174.97	Lutetium	175	97.40	174.94089
72	Hf	178.49	Hafnium	180	35.44	179.94681
73	Ta	180.948	Tantalum	181	100	180.94798
74	W	183.85	Tungsten	184	30.6	183.95099
75	Re	186.2	Rhenium	187	62.93	186.95596
76	Os	190.2	Osmium	192	41.0	191.96141
77	Ir	192.2	Iridium	193	61.5	192.96328
78	Pt	195.09	Platinum	195	33.7	194.96482
79	Au	196.967	Gold	197	100	196.96655
80	Hg	200.59	Mercury	202	29.80	201.97063
81	Tl	204.37	Thallium	205	70.50	204.97446
82	Pb	207.19	Lead	208	52.3	207.97664
83	Bi	208.980	Bismuth	209	100	208.98042
84	Po	210	Polonium	210		209.98287

العدد الذرى Z	الرمز	الكتلة الذرية المتوسطة	العنصر	عدد الكتلة A	الوفرة النسبية %	كتلة النظير
85	At	*	Astatine	211		210.98750
86	Rn	*	Radon	211		210.99060
87	Fr	*	Sanctum	221		221.01418
88	Ra	226.054	Radium	226		226.02536
89	Ac	*	Actinium	225		225.02314
90	Th	232.038	Thorium	232	100	232.03821
91	Pa	231.036	Protactinium	231		231.03594
92	U	238.03	Uranium	233		233.03950
				235	0.715	235.04393
				238	99.28	238.05076
93	Np	*	Neptunium	239		239.05294
94	Pu	*	Plutonium	239		239.05216
95	Am	*	Americium	243		243.06138
96	Cm	*	Curium	245		245.06534
97	Bk	*	Berkelium	248		248.070305
98	Cf	*	Californium	249		249.07470
99	Es	*	Einsteinium	254		254.08811
100	Fm	*	Fermium	252		252.08265
101	Md	*	Mendelevium	255		255.09057
102	No	*	Nobelium	254		254
103	Lw	*	Lawrencium	257		257



(أ) الجمع

ترتيب الكميات التي تجمع ليس مهمًا ، حيث أن $7 + 8$ ، $8 + 7$ كلتاهما تساوى 15 . ولو مثلنا أى رقمين بالرمزين a ، b لصار لدينا $a + b = b + a$.

(ب) الطرح

إذا كانت $a = 6$ و $b = 4$ فكلنا يعرف أن $a - b = 6 - 4 = 2$ و $b - a = 4 - 6 = -2$.

ولكي نطرح عددًا سالبًا فإننا نفعل الآتي : إذا كانت $a = 7$ و $b = -3$ فإن :

$$a - b = 7 - (-3) = 7 + 3 = 10$$

أو إذا استخدمنا الرمزين c و $-e$ فإن $c + e = c - (-e)$

لكي نطرح عددًا سالبًا ، فإننا نغير إشارته ثم نجمعه .

(جـ) الضرب

ليس الترتيب الذى يتم به ضرب أرقام عادية مهمًا : فمثلاً $18 = 6 \times 3 = 3 \times 6$ و $a \times b$ التي قد نكتبها $a.b$ أو ab . وعلينا عند إجراء عمليات الضرب مراعاة قواعد الإشارات التالية :

القاعدة	مثال
$a \times b = ab$	$5 \times 6 = 30$
$(a) \times (-b) = -ab$	$(5) \times (-6) = -30$
$(-a) \times (-b) = ab$	$(-5) \times (-6) = 30$

(د) القسمة

فيما يلى قواعد الإشارات بالنسبة للقسمة :

القاعدة	مثال
$a \div b = \frac{a}{b}$	$15 \div 3 = \frac{15}{3} = 5$
$a \div (-b) = \frac{a}{-b} = \frac{-a}{b} = -\frac{a}{b}$	$15 \div (-3) = -5$
$(-a) \div (-b) = \frac{-a}{-b} = \frac{a}{b}$	$(-15) \div (-3) = 5$

(هـ) الأقواس

تستعمل الأقواس بالطريقة الآتية :

$$(a+b)=(b+a)=a+b$$

$$d(a+b+c)=da+db+dc$$

$$(e+d)(a+b+c)=e(a+b+c)+d(a+b+c)$$

$$-(a-b)=-a-(-b)=-a+b$$

(و) الكسور

الكسر a/b به بسط هو a ومقام هو b . علينا ملاحظة المتطابقات التالية :

$$\frac{a-b}{c}=\frac{a}{c}+\frac{b}{c} \quad \text{و} \quad \frac{a+b}{c}=\frac{a}{c}+\frac{b}{c}$$

$$\frac{a+b}{c+d}=\frac{a}{c+d}+\frac{b}{c+d}$$ ، (وليس $\frac{a}{c}+\frac{b}{d}$)

$$\frac{a}{b}=\frac{a}{b}\times 1=\frac{a}{b}\times\frac{c}{c}=\frac{ac}{bc} \quad \text{و} \quad \frac{a}{b}\times\frac{c}{d}=\frac{ac}{bd}$$

ويوضح المثال السابق أننا نستطيع ضرب كل من البسط والمقام فى نفس المقدار دون أن تتغير قيمته

$$a\div\frac{c}{d}=a\times\frac{1}{c/d}=a\times\frac{d}{c}=\frac{ad}{c}$$

ويعبر عن هذه المتطابقة عادة بالكلمات الآتية :

عند قسمة أى عدد على كسر فإننا نقلب هذا الكسر ونضربه فى العدد .

وكمثال عام على هذا :

$$\frac{a}{b}\div\frac{c}{d}=\frac{a}{b}\times\frac{d}{c}=\frac{ad}{bc}$$

وضرب كل من البسط والمقام فى نفس الكمية لا يغير من قيمة الكسر ، ولذلك نستطيع أن نختصر المعاملات المتماثلة من البسط والمقام . وعلى سبيل المثال

$$\frac{ab+bc}{bd}=\frac{b(a+c)}{bd}=\frac{(a+c)}{d} \quad \text{و} \quad \frac{ax}{ay}=\frac{a}{a}\times\frac{x}{y}=1\times\frac{x}{y}=\frac{x}{y}$$

ولكن عليك بالحذر لأن $\frac{ab+c}{bd}$ ليست $\frac{a+c}{d}$.

لابد أن يشمل كل حد فى البسط وفى المقام نفس المعامل وإلا فإنه لا يختصر .

(ز) الأسس

فى القدار a^c نطلق على c أس a ، ومن تعريف الأس (أو القوة) ينتج أن :

$$a^{-3}=\frac{1}{a^3}=\frac{1}{a.a.a} \quad , \quad a^{-1}=\frac{1}{a} \quad , \quad a^3=a.a.a \quad , \quad a^0=1$$

وتنطبق القواعد التالية

$$\frac{1}{a^{-n}}=\frac{1}{1/a^n}=a^n \quad , \quad a^{-n}=\frac{1}{a^n} \quad , \quad (ab)^n=a^nb^n \quad , \quad a^na^m=a^{n+m}$$

$$(a^n)^m=a^{nm} \quad \rightarrow \quad (a^n)^{1/2}=a^{n/2}=\sqrt{a^n}$$

(ح) المعادلات

هب أننا نريد حل المعادلة الآتية لإيجاد قيمة x :

$$5x + 7x^2 = 3(2 - x)$$

وباستخدام قاعدة الأقواس ، تصبح هذه المعادلة $5x + 7x^2 = 6 - 3x$ ، وعند استعمال القواعد الواردة فيما بعد يمكننا إعادة كتابة المعادلة على النحو التالي

$$7x^2 + 8x - 6 = 0$$

وهذه المعادلة على الصورة $a x^2 + bx + c = 0$ ويمكن حلها لإيجاد x باستخدام المعادلة التربيعية :

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

وفي حالة هذا المثال فإن $x = -3.32$ و $x = 1.03$

ويمكننا استخدام القواعد التالية لتبسيط المعادلات :

القاعدة 1 : الكميات المساوية لكمية معينة تكون فيما بينها متساوية .

لذلك إذا كان $a + b = c$ وكان $x = c$ ، فإن $a + b = x$

القاعدة 2 : حيث أن الكميات المتساوية التي تضرب في (أو تقسم على) نفس الكمية تظل كما هي ، فإننا نستطيع أن نضرب (أو نقسم) كل جانب من جانبي المعادلة في نفس الكمية وتظل كما هي .

$$\frac{a}{b}x = c \quad \rightarrow \quad \frac{b}{a}.\frac{a}{b}x = \frac{b}{a}c \quad \rightarrow \quad x = \frac{bc}{a}$$

القاعدة 3 : يستخدم ضرب الطرفين في الوسطين هكذا

إذا كان $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ فإن $da = bc$

وهذا ناتج مباشرة من القاعدة 2 ، عندما نضرب كلا الطرفين في المعادلة في bd ثم تختصر المعاملات المتشابهة .

القاعدة 4 : يمكننا أن نرفع كلا الطرفين إلى نفس الأس (القوة) .

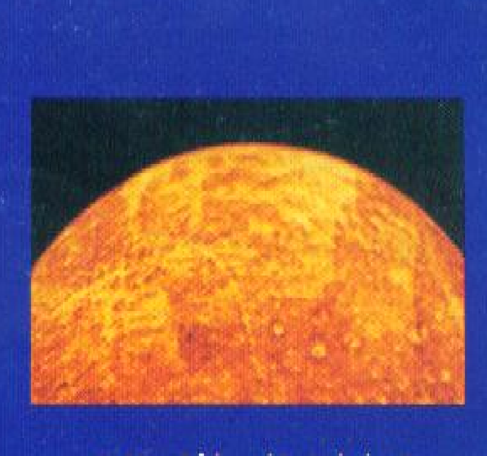
وعلى سبيل المثال ، إذا كان $9x^2 = 5$ ، فإننا نستطيع تربيع الطرفين لنجد أن $81x^4 = 25$

أو نستطيع أخذ الجذر التربيعي لكل من الطرفين (أي رفع كل من الطرفين للقوة $\frac{1}{2}$)

لنجد $3x = \sqrt{5}$. ويمكن إثبات هذا باستخدام القاعدتين 1 ، 2 .

القاعدة 5 : يمكن نقل أحد حدود المعادلة من طرف إلى الطرف الآخر بشرط تغيير إشارته .

فمثلاً : $x^2 - 5x = 8$ تصبح $x^2 - 5x - 8 = 0$. وتتضمن هذه القاعدة ببساطة جمع وطرح نفس الكمية (وهي الرقم 8 في هذه الحالة) من كلا طرفي المعادلة .



إجابات المسائل ذات الأرقام الفردية

الفصل الأول

1 (أ) 26.8 m/s ، (ب) 3.16×10^{7} s ،
(جـ) 402.3 m ، (د) 4921 ft ؛ (هـ) 666.7 m/min

3 (أ) 6.28×10^{4} m ، (ب) 2.26×10^{-6} m ،
(جـ) 3.33×10^{-8} m ، (د) 1.358×10^{-4} m
(هـ) 3.00×10^{1} m

5 1.31×10^{-1}

7 (أ) 4 ؛ (ب) 4 ؛ (جـ) 3 ؛ (د) 2 ؛ (هـ) 4

9 5.83×10^{9}

11 152 in

13 (أ) 4.0×10^{-18} ، (ب) 1.17×10^{-9} ،
(جـ) 6×10^{29} ، (د) 2.96×10^{-2}

15 7 بلوكات ، 26.0° جنوب الشرق .

17 128 ؟؟ ، 64.0° جنوب الغرب .

19 1420 km ، 32.0° شمال الشرق .

21 23.0° و 203°

23 553 m ، 46.0° جنوب الشرق .

25 128 خطوة ، 61.0° جنوب الغرب .

27 1430 km ، 32.0° شمال الشرق .

29 $B_x = 48.0$ m و $B_y = 28.0$ m

31 $A_x = -0.930$ cm ، $A_y = +0.560$ cm ،
$A_z = +1.15$ cm

33 135 m ، 35.0° مع الرأسي .

35 $BC = 697$ mi بزاوية 10.0° غرب الجنوب .
$AC = 571$ mi

الفصل الثانى

1 (أ) 480 mi/h ، 215 m/s

3 1.34×10^{-9} s

5 (أ) 2.60 m/s بزاوية 69.4° مع المحور x ،
(ب) 3.40 m/s

7 (أ) 1.00 cm/s ، (ب) 0.857 cm/s ،
(جـ) −0.400 cm/s ، (د) −1.00 m/s ،
(هـ) 0 cm/s .

9 11.2 s

11 16.7 ، 0 و 32.5 m/min− فى اتجاه الشرق

13 $v_{av} = 7.30$ cm/s ، $v_A = 20.0$ cm/s ، $v_B = -7.00$ cm/s

15 59.1 m

17 0.970 m/s^2

19 $a = -2.19\ m/s^2$ ، $x = 128$ m

21 $a = 2.10 \times 10^{-2}\ mi/s^2$ ، $v_f = 0.103$ mi/s

23 $t = 1.79 \times 10^{-10}$ s ، $a = 6.98 \times 10^{17}\ m/s^2$

25 $a = -5.85 \times 10^{5}\ m/s^2$ ، 1.88×10^{-4} s

27 (أ) 1930 m ، (ب) 5.60 m/s

29 (أ) 106 s ، (ب) 20.3 s

31 $a = -3.72\ m/s^2$

33 $y = 8.54$ m ، $v_f = 12.9$ m/s

35 $t = 1.09$ s ، $v_f = 29.2$ m/s

37 $t = 3.37$ s ، $v_f = 24.2$ m/s

39 $h_1 = 191$ m و $h_2 = 143$ m

41 0.434 s

43 115 m

45 4.23×10^{3} m ، 25.8 s

47 62.5 mi/h 77.0° شمال الغرب ، 20.8 mi

49 83.3 m/s

51 4367 ft

53 $t = (v_0/g)[1+\sqrt{1+(2gh/v_0^2)}]$

55 9.10 m

57 13.9 s

الفصل الثالث

1 157 N ، 29.5 m/s

3 (أ) $3.03\ m/s^2$ ، (ب) 4100 N

5 325 N

7 (أ) 706 N ، (ب) 770 N

9 2506 N

11 -2544 N

13 (أ) صافي القوة المؤثرة على الكرة يساوي صفراً ؛ (ب) $F = -W$

15 -5645 N

17 (أ) 2.21 lb ، (ب) 132 lb ؛ (جـ) 2970 lb ؛
(د) 2000 lb ؛ (هـ) 1.00 lb

19 58.2 N

21 (أ) 160 N ؛ (ب) و (جـ) 98.0 kg

23 (أ) 47.0 N ، (ب) 69.4 N ؛ (جـ) 37.5 N

25 (أ) 19.7 N و 10.3 , $f = 21.8$ ؛
(ب) $a = 4.95$, 5.15 و $2.24\ \text{m/s}^2$

27 $\mu = 0.800$ هذا احتكاك استاتيكي .

29 35.3 m

31 71.9 m

33 -2.05×10^5 N

35 $a = 36.1\ \text{m/s}^2$

37 107 m

39 بدون احتكاك : $a = 5.27\ \text{m/s}^2$ و $T = 15.8$ N في وجود
احتكاك : $a = 2.04\ \text{m/s}^2$ و $T = 15.8$ N

41 (أ) $a = 3.62\ \text{m/s}^2$ ؛ $T = 11.8$ N ،
(ب) $a = 1.63\ \text{m/s}^2$ ، $T = 15.5$ N

43 $T = 163$ N ؛ $t = 0.821$ s

45 $T = 0.268$ N ، $t = 0.980$ s

47 $T = 0.892$ N ؛ $T' = 2.82$ N ؛ $a = 2.07\ \text{m/s}^2$

49 $F = (M + m)g/\mu$

51 (أ) $13.8\ \text{m/s}^2$ ، (ب) $3.49\ \text{m/s}^2$

53 $\mu = 0.363$

55 (أ) $T_t = 4.85$ N و $T_b = 2.70$ N
(ب) $T_t = 13.0$ N و $T_b = 7.23$ N
(جـ) $T_t = 0.9990$ N و $T_b = 0.550$ N
(د) $T_t = 0$ N و $T_b = 0$ N ،
(هـ) $T_t = 4.85$ N و $T_b = 2.70$ N

57 (أ) 46.4 m ، (ب) 5.39 m

59 $a = (\mu \cos\theta + \sin\theta)g$

61 (أ) $F_N = 14.2$ N ، (ب) $a = 8.70\ \text{m/s}^2$
(جـ) $F_N = 46.2$ N ؛ (ب) $a = 0\ \text{m/s}^2$

63 $m_1 = 0.107$ kg

الفصل الرابع

1 $T_u = 60.0$ N و $T_1 = 25.0$ N

3 400 N بزاوية 260° مع المحور x .

5 (أ) $T_1 = 180$ N ؛ $T_2 = T_3 = 90.0$ N
(ب) $T_1 = 205$ N ، $T_2 = T_3 = 90.0$ N.

7 1072 N

9 $\theta = 22.7°$

11 50.0 N

13 $T_L = 650$ N ، $T_R = 862$ N

15 $W_1 = 230$ N ؛ $W_3 = 193$ N

17 $W_1 = 1128$ N ، $W_2 = 489$ N ؛ $W_3 = 639$ N

19 $T_1 = T_2 = T_4 = W_2 = 300$ N ، $T_3 = 600$ N

21 $\tau_{90} = \tau_{50}$ ، $\tau_{80} = +120$ N.m ، $\tau_{70} = +303$ N.m ،
$\tau_{60} = -150$ N.m

23 (أ) 2.00 m ؛ صفر ، صفر ؛ 2.00 m ؛ 2.83 m
(ب) $-2.00\,F_1$ ، صفر ، صفر ، $+2.00\,F_4$ ، $+2.83\,F_5$

25 400 N

27 $\tau = 2.00 \times 10^{-3}$ N.m

29 120 N

31 $W_1 = 253$ N و $T_2 = 293$ N

33 4000 N

35 (أ) $T = 1987$ N ؛ (ب) $H = 822$ و $V = 140$ N

37 6.00 m

39 (أ) $T = 1987$ N ؛ (ب) $H = -320$ و $V = 2491$ N

41 $\theta = 21.8°$

43 $w = W[1 + (L/2b)]\cos\theta$

45 23.4°

47 1512 N

49 1.13 m

الفصل الخامس

1 70.0 J

3 8222 J

5 720 J

7 4.00 m/s

9 3528 J

11 1868 J

13 0.134 hp

15 12.0 W

17 4662 N

19 0.239 m/s

21 1.31 s

23 4.00×10^5 J

25 89.4 m

27 70,000 J ، 90,000 J ، 0.777

29 3006 W

31 1.62×10^5 J

33 (أ) 900 N ، (ب) 0.600 s

35 17,640 J

37 9.80 J

39 (أ) 1.88×10^8 J ، (ب) 93.4 hp

41 4.43 m/s

43 14.4 N

45 13.3 N

47 (أ) 83.8×10^7 J ، (ب) 0.940 ، (جـ) 2925 hp

49 (أ) 10.0 m ، (ب) 1.27 m ، (جـ) 7.66 m/s

51 0.541 أو 54.1%

53 $v_B = 10.0$ m/s ، $v_C = 7.81$ m/s

55 5.94 m/s

57 19.2 km/gal

59 (أ) 14.3 ، (ب) 21.3 ، (جـ)67.0% في المائة .

61 AMA = 8.40 ، IMA = 9.44

63 0.590 hp

65 (أ) 339 N ، (ب) 0.0399 N

67 7.78°

69 (أ) 70.1 J ، (ب) −21.2 J ، (جـ) −9.25 J ،
(د) 19.7 J

71 (أ) 480 kJ ، (ب) 470 kJ

73 8.97°

الفصل السادس

1 (أ) 35,625 kg.m/s شمالا ، (ب) 9.33 kg.m/s إلى أعلى
(جـ) 6.53×10^8 kg.m/s غربًا .

3 $p = m\sqrt{2gh}$ إلى أسفل .

5 $KE = p^2/2m$

7 28,500 N

9 −7236 N

11 $\Delta t = 9.04 \times 10^{-11}$ s ، $\bar{F} = 7.95 \times 10^{-10}$ N

13 (أ) الدفع $= 0.0546t$ N.t ، (ب) $F = 0.0546$

15 $V = vM_1/(M_1 + M_2)$

17 12.0 m/s إلى أعلى .

19 (أ) $v = 0.141$ m/s ، (ب) $F = 0.0319$ N

21 $v_a = 16.4$ m/s ، $v_d = 34.8$ m/s ، $v_u = 16.4$ m/s ،
$v_d = 60.4$ m/s

23 $m_2 = 1.45\, m_1$

25 $v_1 = 5v_0/9$ و $v_r = 14v_0/9$

27 $V = 0.0351\, v_0$

29 $\Delta KE/KE_0 = 4k/(k + 1)^2$ وقيمته أكبر ما يمكن عند $k = 1$ أو
$m_1 = m_2$

31 $t = 65.2$ s

33 28.8 cm

35 $t = 26.1$ s

37 $v = 0.721\, v_0$ ، 56.0° شمال الغرب .

39 $(-v_0/2 , -v_0/2)$ ، والتصادم تام المرونة .

41 $3.48\, v$ ، 27.6° تحت المحور x السالب .

43 20.2 m/s 29.7° شمال الشرق .

45 $t = 854$ s

47 4.05 m

49 $V = \sqrt{gL/8}$

51 (أ) 38/8 m/s ، (ب) 178 N

الفصل السابع

1 (أ) 0.559 rad ، (ب) 152° ، (جـ) 241°

3 0.0329 rad ، 1.89° ، 5.24×10^{-3} rev

5 0.105 rad/s

7 (أ) 3.46 rad/s ، (ب) 44.6°

9 4.53 rad/s^2

11 (أ) 0.00284 rev/s^2 ، (ب) 0.688 rev

13 1.03 rev/s

15 400 cm/s

17 22.3 rev

19 1.15 red/s^2

21 (أ) 463 m/s ، (ب) $v_T = 0$

23 15.8 m

25 2527° s

27 (أ) 125 m ، (ب) 63.9 rev

29 (أ) 221 rev ، (ب) 87.0 m

31 1.85 rad/s^2 ، 81/5 rev

33 17,040 N

35 1.07

37 0.340 rev/s

39 17.1 m/s

41 16.2 m/s

43 1.86×10^{-40} N ، 1.14×10^{-14}

45 0.314

47 $R_m/R_g = 0.270$

49 1.87×10^{27} kg

51 3.18°

53 30.3 h

55 2.57 N

57 4070 N

59 2.57 rev/s

الفصل الثامن

1 0.339 J

3 49.3 J

5 (أ) 1.67×10^{-2} J ، (ب) 2.83×10^{-4} N.m

7 0.500 rad/s^2

9 12.8 kg.m^2

11 107 N

13 12.6 s

15 22.6 rev

17 3.26 m

19 (أ) $4ma^2$ ، (ب) $4mb^2$ ، (جـ) $4m(a^2 + b^2)$

21 $Ma^2 + 2m(a^2b^2)$

23 (أ) $2MR^2$ ، (ب) $3MR^2/2$

25 $ML^2/3$ ، $ML^2/9$

27 70.7 J

29 22.2 J

31 0.302 N

33 324 J

35 $I = 0.0153$ kg.m^2 ، $T = 0.577$ N

37 (أ) 3.61 rad ، (ب) 0.650 J

39 (أ) 8.05 rad/s ، (ب) 7.46 rev/s

41 (أ) 2.21 m/s ، (ب) 5.87 rev/s

43 1.45 cm

45 13.3 J

47 $v_s = 1.20\sqrt{gh}$ ، $v_d = 1.15\sqrt{gh}$ و $v_r = \sqrt{gh}$
تصل الكرة إلى أسفل أولاً .

49 11.3 kg.m^2.s

51 (أ) 0.600 kg/m^2 ، (ب) 27.8 rev/s

53 43.3 rev/min

55 (أ) $4v_0/3$ ، (ب) $2v_0$ ، (جـ) $3v_0$

57 5.81 rev/min

59 2.91×10^{-4} s ، 1.00×10^{10}

61 $\Delta KE/KE = 2m(M + 2m)$

63 $v = 5.71$ m/s ، $\omega = 28.4$ rad/s

65 4.52 m

الفصل التاسع

1 0.867 g/cm^3

3 90.0 kg

5 58.9 g

7 31.6 في المائة .

9 1750 kg/m^3

11 0.860 m

13 3.51×10^{11} N/m^2

15 6.54×10^{-6} m

17 1.62×10^5 N

19 4630 Pa

21 8.33×10^6 Pa

23 $\Delta V/V = 2.70\ 10^{-6}$

25 503 N

27 1.18×10^5 Pa

29 102 kPa

31 (أ) 1.61×10^7 Pa ، (ب) 0.740 في المائة

33 6.00 m

35 11.5 cm

37 99.4 kPa

39 1.41 N

41 10.3 m

43 $P/W = 272$

45 0.0677 N

47 0.872 g/cm^3

49 964 kg/m^3

51 750 kg/m^3

53 7056 N

55 23.9 g

57 0.152 kg

59 $Q/Q_0 = 16.2$

61 21.5 cm^3/s

63 0.278 cm^3/s

65 0.361 cm

67 (أ) 39.9 kPa ، (ب) 22.8 kPa

69 511 kN

71 4.91×10^4 Pa

73 222 m/s

75 0.0409 m/s

77 459 m/s

79 7.10×10^{-7} m

81 $v_{t1} : v_{t2} : v_{t3} = 1 : 4 : 9$

83 1.20×10^{-5} m

85 3.18×10^{4} N

87 77.65 cmHg

89 (أ) $P_2 - P_1 = 2845 - 45.0\,(r_1 / r_2)^4$ Pa ،
(ب) كما في الجزء (أ) .

91 $F = -500$ N ، عكس تدفق الماء .

93 $W = 3.65 \times 10^{6}$ N ، يمكنه رفع وزن أكبر في اليوم البارد .

الفصل العاشر

1 (أ) 296 K ، (ب) −18.4° F ، (جـ) 944° F

3 −473.17° F ، 20.28 K

5 (أ) $T_m = 193.04\,°C$ ، (ب) $T_b = 907.88°\,F$ ،
$T_m = 379.47°\,F$

7 $T_h = 331$ K ، $T_l = 183$ K

9 474 K = 474° F

11 2.82×10^{-26} kg

13 3.86×10^{23} جزيئًا .

15 2.68×10^{24} جزيئًا .

17 (أ) 7.67×10^{-26} kg ، (ب) $N = 1.03 \times 10^{25}$

19 30.0 g

21 66.0 kg الهواء سيترك الغرفة .

23 34.9 g/mol

25 $V = 2.61\,V_0$

27 9.40 لترًا

29 $T_2/T_1 = 1.50$

31 (أ) 927° C ، (ب) كما في الجزء (أ) .

33 73.1 kPa

35 10.6 cm

37 1.72 m^3

39 1.43 kg/m^3

41 1827° C

43 6.21×10^{-21} J

45 901 K

47 $P = \rho \bar{v}^2 / 3$

49 1.94×10^{-24} kg

51 (أ) 8.14×10^{-21} kg ، (ب) 2214 m/s
(جـ) 3.92×10^{9} Pa

53 24.6 cm ، 148 kPa

55 ارتفاع عمود الهواء 20.0 cm .

57 296 kPa

59 (أ) 6.45 kg ، (ب) 732 kPa

61 1.40 لترًا .

63 64.1 kg/m^3 ، 652 m/s

الفصل الحادى عشر

1 49.7 kJ

3 9193 J

5 25.1 kJ

7 835 kJ

9 29.1° C

11 1.84 g

13 1.79×10^{-6} g

15 17.2 g

17 $E / kT = 12.4$

19 2.30×10^{4} s

21 1626 m

23 $x = 0.0208$

25 $\Delta L / L = 8.75 \times 10^{-4}$

27 1.13 cm

29 757° C

31 $\Delta V = 27.0 \times 10^{-3}\ cm^3$

33 $L_s / L_b = 1.58$

35 3.21×10^{6} J

37 1.15×10^{6} J/s

39 (أ) 58.3 W ، (ب) 57.3 W

41 354 K

43 (أ) 0.0175 m^2.K/W ، (ب) 0.1640 m^2.K/W

45 (أ) $\Delta Q / \Delta T = 0.2525\,\Delta T$ ، (ب) $\Delta Q / \Delta T = 1.974\,\Delta T$
(جـ) $\Delta Q / \Delta T = 2.857\,\Delta T$

47 (أ) 170° C ، (ب) 165° C

49 473° C

51 $KE = MR_0^2 \omega_0^2$

53 0.0577 ° C

الفصل الثانى عشر

1 737 kJ

3 6.13° C

5 $W_{CA} = 1032$ kJ

7 (أ) $\Delta U = 0$ ، (ب) $\Delta Q = -167$ J

9 0.251 g ، 6.27×10^{-5} kmol

11 (أ) 3850 J ، (ب) 2580 J

13 721 J/kg.K

15 153 kJ

17 $\Delta Q = -6630$ J

19 $C_V = 3.57\,R$ ، $C_p = 4.57\,R$

21 $Q = 8392$ J ، $W = 2405$ J ، $\Delta U = 5987$ J

23 $\Delta U = 3788$ J ، $\Delta Q = 1660$ J ، $W = 3156$ J

25 106 kJ

27 $V_2/V_1 = 1.61$

29 1.60 atm ، $-153°$ C

31 (أ) $Q = 539$ kcal ، (ب) $\Delta U = 0$

33 $W/Q = 0.219$ ، $\Delta U/Q = 0.781$

35 $W/Q = 3.19 \times 10^{-6}$

37 (أ) $M = 22.6$ kg/mol ، (ب) $\gamma = 1.41$

الفصل الثالث عشر

1 (أ) هناك 4 طرق ممكنة : (0H,3H) ، (1H,2H) ، (2H,1H) ، (3H,0H)

(ب) 0.125 ، (جـ) 0.375

3 (أ) يوجد 64 ترتيبًا ممكنًا .

(ب) يوجد 6 طرق للحصول على مجموع قدره 5 باحتمالية قدرها 0.09375 ، ويوجد 3 طرق للحصول على مجموع قدره 11 باحتمالية قدرها 0.06488 ، المجموع الأكثر احتمالاً هو 7 أو 8 واحتماليته 0.1875 .

5 (أ) 8 ، (ب) 32 ، (جـ) 1.13×10^{15}

7 15.8 J/K

9 -0.339 J/K

11 24.7 J/K

13 (أ) 2.22×10^{-23} J/K ، (ب) 4.13×10^{-23} J/K ، (جـ) $S = 0$

15 0.607

17 6.05×10^8 J

19 1.56

21 (أ) $Q = 3886$ J ، $W = 3855$ J ، (ب) 0.240 ، (جـ) 0.500

23 1.60

25 (أ) 7.81 ، (ب) 4.47

27 $T_f = 273$ و $T_b = 373$ وهو نفس مقياس كلفن .

29 (أ) 0.250 و 0.490 ، (ب) 0.505 ، (جـ) 0.871

31 (أ) $4.63 ، (ب) $8.72 ، (جـ) $2.18

الفصل الرابع عشر

1 (أ) $f = 0.195$ Hz ، (ب) $T = 5.12$ s ، (جـ) $A = 9.60$ cm

3 3.74×10^{-4} J

5 (أ) 1.10 m/s ، (ب) 24.0 m/s^2

7 24.6 m/s

9 (أ) 11.3 N/m ، (ب) 1.05 m/s^2 ، (جـ) $v = 0.147$ m/s ، $a = 0.750$ m/s^2

11 (أ) 0.229 m/s^2 ، (ب) 0.229 m/s^2 ، (جـ) 3100 m/s

13 (أ) 2.17×10^4 N/m ، (ب) 2.03 cm

15 $f = (1/2\pi)\sqrt{AY/Lm}$

17 (أ) $k = 7.63$ N/m ، (ب) $y_0 = 9.40$ cm ، (جـ) $f = 1.08$ Hz ؛ (د) $T = 0.924$ s

19 (أ) $x(t) = 0.0295 \cos(6.74t)$m ، $v(t) = -0.199 \sin(6.74t)$ m/s

(ب) $x(t) = -0.0287, -0.0265$ و 0.0180 m ، $v(t) = 0.0451, -0.0878$ و -0.158 m/s

(جـ) $t = 2.80$ s ، (د) $t = 0.312$ s

21 $L_1/L_2 = 0.111$

23 $g_{pole} = 9.7516$ m/s^2 ، $g_{eq} = 9.8004$ m/s^2

25 13.5 N/m

27 7.60 Hz

29 5.77×10^{14} Hz

31 1.80 s

33 116 N

35 118 N

37 1300 N

39 96.7, 193.3, 241 و 290 Hz

41 (أ) 550 Hz ، (ب) $L_1 = 2L/5$

43 (أ) $m_4 = 774$ g ، (ب) $m_5 = 495$ g ، (جـ) $m_6 = 344$ g

45 (أ) 49.7 J ، (ب) 2.95×10^4 N/m

47 0.348 Hz

49 الساعة تبطئ (تؤخر) ؛ ولخطأ يساوي 2.59 s كل 12 h .

الفصل الخامس عشر

1 1870 m

3 0.219 m و 0.642, 1.89

5 343.65 m/s

7 1434 m/s

9 22.1 GPa

11 (أ) 5.20×10^3 s ، (ب) 192 Hz ، f يقل عند الأعماق الأقل .

13 17.0 W/m^2 ، 0.227 في المائة .

15 66.4 dB

17 (أ) 2.00×10^{-8} W/m^2 ، (ب) 1.80×10^{-11} W

19 26 في المائة يجب إزالتها .

21 3.16×10^{-10} W/m^2

23 5.22×10^{-4} J

25 3.16×10^{-9} W/m^2

27 40.1, 80.2 و 120.3 Hz

29 (أ) $x = \pm 10.0$ cm ، (ب) $x = 5.00 \pm 10.00$ cm

31 $x = 2.30 \pm (0.1050 + 0.210n)$ m حيث $n = 1, 1, 2, 3, \ldots$

33 (أ) $y_{min} = 0.445$ m ، (ب) $\theta = 12.9°$

35 0.700 Hz

37 للأنبوبة مفتوحة الطرفين : $f_1 = 188$ H_3 ، $f_2 = 376$ H_2 ، $f_3 = 564$ H_3 ، وللأنبوبة المفتوحة من أحد الطرفين فقط : $f_1 = 93.9$ H_3 ، $f_2 = 282$ H_2 ، $f_3 = 470$ H_3

39 1.05 m

41 (أ) 83.0 ، 249 ، 415 ، 581 و 747 Hz
(ب) ؟؟؟؟؟؟؟؟

43 10.0 Hz

45 16.2 m/s ، 17.9 m/s

47 (أ) $f' = f$ ، (ب) $f' = f$

49 16.7 m/s

51 2831 m

53 14.3 ، $\theta_s = 4.00°$

55 $t = (23.0 \pm 2.15)°$ C

57 50.4 m

59 37.8 m/s

الفصل السادس عشر

1 (أ) -1.28 mC ، (ب) 1.18 mC

3 (أ) 0.188 N ، (ب) 1.15×10^{-25}

5 4.80 N ، في اتجاه $x-$

7 $q_1 = 4.48\ \mu C$ و $q_2 = 2.62\ \mu C$

9 $q = 0.890\ \mu C$ لكليهما نفس الإشارة .

11 5.17 pC

13 (أ) 1.50 N− في اتجاه $x-$
(ب) 0.906 N في اتجاه $x+$

15 -10.5 N

17 80.8 N باتجاه القطر الذي يمر خلال الشحنة $5\mu C+$ بعيدا عن نقطة الأصل .

19 39.0 N اتجاه منصف الزاوية نحو الخارج .

21 1.50 N عند $-75.0°$

23 7.02×10^{-3} N ، $26.4°$ تحت محور x .

25 7.90×10^{-8} C

27 1.44×10^{-9} N/C نحو الإلكترون ، للبروتون ، نفس المقدار ، بعيدا عن البروتون .

29 (أ) 405 N/C ؛ (ب) 80.0 kN/C

31 (أ) $E = 0$ ، (ب) 5.38×10^5 N/C

33 2.66×10^5 N/C عند $-77.8°$ مع محور x

35 2500 N/C نحو الغرب .

37 6.32×10^{14} m/s^2 ، باتجاه المحور $x-$.

39 $q = -0.817\ \mu C$

41 $E = (mg/q) \tan \theta$

43 1.72 μC

45 5.00 μC و 2.00 μC

47 (أ) 1.62 N ؛ (ب) 0.144 N

49 5.13×10^{11} N/C

51 $E = 0$

53 $E_x = 9.13 \times 10^4$ N/C ، باتجاه المحور $x-$.

55 (أ) $y = (-eE/2m_e)t^2$ ؛ (ب) $y = (-eE/eme v_{x0}^2)x^2$

57 5000 N/C ، موازيا لسرعة الإلكترون .

59 $E_y = 2kqy(b^2 + y^2)^{3/2}$

الفصل السابع عشر

1 +54.0 J ، -54.0 J

3 (أ) 2.50×10^3 V/m ؛ (ب) -4.00×10^{-16} N

5 2.31×10^6 J

7 (أ) +320 V ؛ (ب) 0 ؛ (جـ) -400 V ، (د) -480 V

9 (أ) 1.46×10^{-8} s ، (ب) -5.27 cm

11 (أ) $2.68\ 10^5$ m/s ، (ب) 6.91 μs

13 1.67×10^6 V/m

15 $v = \sqrt{v_0^2 \pm 1.92 \times 10^6 V}$

17 0.712 V

19 7.75×10^5 m/s

21 (أ) 250 keV ؛ 4.00×10^{-14} J ، (جـ) 6.92×10^6 m/s

23 0.0060 J

25 10.4 MV

27 3.42 MV ، 3,42 MV

29 28.2 eV

31 -6.36×10^{15} V

33 -4.80 m

35 -22.5 V

37 0.200 μF

39 1.50 μF

41 4.03×10^{-3} m^2

43 (أ) 6.37 nF ، (ب) 57.3 nF

45 3.39×10^{-3} m^2

47 3.00

49 (أ) 18.0 μF ، (ب) 9.00 V ؛ (جـ) 108 μC

51 (أ) 220 pF ؛ (ب) 20.0 pF

53 4.44 μC ، 60.0 μC و 4.80 μC

55 (أ) 3.00 pF ؛ (ب) شحنات مقدار كل منهما 18 pC ، فروق الجهد هي 4.5 V و 3.00 V .

57 2.00

59 8.10×10^{-11} J و 2.70×10^{-11} J

61 3.28 pC

63 6.50×10^{7} m/s

65 1.35 J

67 -18,000 V

69 $V_c = 3.00$ V ، $q_1 = 3.00\ \mu$C ؛ $q_2 = 9.00\ \mu$C

71 (أ) 3.60 pC ؛ (ب) 9.00 V ، (جـ) -1.62×10^{-10} J
(د) +0.1620 nJ

73 3.88 μF

75 (أ) 100 V ، (ب) 600 μC

الفصل الثامن عشر

1 (أ) 7200 C ، 4.50×10^{22} إلكترون

3 0.889 s

5 0.512×10^{4} C

7 0.512 μA

9 0.400 A

11 50.0 Ω

13 (أ) 0.320 A ، (ب) 0.480 A

15 0.540 Ω

17 0.334 Ω

19 (أ) 0.413 Ω ، (ب) 4.95 A

21 0.540 Ω

23 2.08×10^{-3} /C°

25 270°

27 (أ) 0.833 A ؛ (ب) 144 Ω

29 2.33×10^{-8} m^2

31 2.52 W

33 (أ) 22.5 kJ ، (ب) 6.25×10^{-3} kWh

35 $4.90

37 5.00 Ω

39 (أ) 1.30 Ω ، (ب) $I_6 = 1.50$ ؛ $I_3 = 4.50$ و $I_1 = 0.900$ A

41 (أ) 16.5 Ω ، (ب) 0.182 A

43 0.158 و 0.0394 A

45 9.60 V

47 (أ) 0.764 A ، (ب) 0.335 A

49 (أ) 13.67 Ω ، (ب) 0.439 A ، (جـ) 0.0880 A ، (د) 0

51 $I_1 = 0.300$ ، $I_2 = 0.643$ و $I_3 = -0.943$ A

53 (أ) $I_1 = -3.00$ ، $I_2 = 0$ و $I_3 = 3.00$ A ، (ب) -12.0 V
(جـ) 12.0 V

55 $I_1 = 0.0050$ ، $I_2 = -0.145$ و $I_3 = 0.140$

57 6.53 Ω

59 11.3 V

61 (أ) 40.0 V ، (ب) 33.2 kΩ ، (جـ) 33.7 V

63 15.5 A

65 24

67 100 W

69 9.81 A

71 0.800 Ω

73 (أ) 2.00 Ω ، (ب) 8.70 V

75 سبع عشرة طريقة مختلفة

77 4.00 Ω و 36.0 Ω

79 90.0 Ω

81 (أ) 7.31 V ، (ب) 2.31 V ، (جـ) 0.165 W

الفصل التاسع عشر

1 0.0525 N

3 4.50 N

5 (أ) 0 ، (ب) 3.60×10^{-5} N

7 3.53 mA

9 0.784 T

11 (أ) 0.219 N باتجاه المحور z- (ب) 0.0976 N بامتداد محور z+ (جـ) (0)

13 (أ) 0 ، (ب) 4.80×10^{-16} N بامتداد المحور x-
(جـ) 4.80×10^{-16} N بامتداد محور x+

15 938 T

17 (أ) 1.15×10^{-17} N بامتداد المحور z-
(ب) 2.00×10^{-17} N بامتداد z+ ، (جـ) 2.30×10^{-17} N في مستوى xy على زاوية 30.0- مع محور x+

19 (أ) 2.56×10^{14} T ؛ (ب) الأفقي عموديًا على V_p

21 8.54×10^{-6} T بامتداد محور y-

23 17.4 cm

25 2.40 m

27 0.430 T

29 19.8 cm

31 $KE = q^2r^2B^2/2m$

33 4.00 T

35 1.53×10^5 N

37 3.24×10^7 m/s

39 5.12×10^{-27} kg

41 2.00 cm

43 (أ) 1.00×10^{-5} T في اتجاه متعامد مع مستوى الأسلاك .
(ب) 3.00×10^{-5} T

45 11.9 A

47 2.09 mT

49 (أ) 0 ، (ب) 4.47×10^{-3} T

51 2.00 A

53 (أ) 1.92 N.m ، (ب) 0 ، (جـ) 1.92 N.m ،
(د) 1.92 N.m ، (هـ) $\mu = 2.40$ N.m^2

55 0.0835 Ω

57 0.200 Ω

59 3.01×10^{-19} C

61 (أ) 10.3 cm ، (ب) 20.6 cm

63 0.416 cm

65 1.30 A

67 $B = \mu_0 Qf$

الفصل العشرون

1 2.51×10^{-12} Wb

3 (أ) 5.40×10^{-3} Wb ، (ب) 0 ، (جـ) 4.68×10^{-3} Wb

5 1.38×10^{-3} Wb

7 (أ) 0 ، (ب) 2.51 A mWb ، (جـ) 5.03 A mWb

9 0.0288 V

11 1.96 V

13 0.111 mT

15 6.40×10^{-5} V

17 (أ) 2.56 mT ، (ب) 128 mV

19 297 m

21 $Nbbv$

23 2.00 T

25 3.77 V

27 356

29 2.40×10^{-7} Wb

31 1.44×10^{-4} Wb

35 8.33 mH

37 (أ) 0 ؛ (ب) 3.54 V ، (جـ) 5.67 V

39 10.4 mA

41 0.160 J

43 0.300 T

45 (أ) 14.4 J ، (ب) 5.72 mJ ، (جـ) 10.8 mJ

47 8.31 mV

49 (أ) 0.600 V

51 8.31 mV

53 $V = 4.52 \sin 240\pi t$ V

55 11.8 mT

57 0.201 V

59 (أ) 100 V ، (ب) 24.0 A

61 120 V

63 (أ) 4.80 Ω ، (ب) 108 V

65 (أ) 7.14×10^{-3} ، (ب) 0.857 V

67 500 V

69 76.8 Ω

71 1.67×10^{-5} Wb

73 $L_e = L_1 + L_2$

75 (أ) $39.9\,a$ فولت ، (ب) $1.60\,A$ A ؛ (د) $3.19a^2$

77 319 m/s

الفصل الحادى والعشرون

1 8.99 MΩ

3 (أ) $q = 0$ ، (ب) 45.5 μC

5 (أ) 20.0 s ؛ (ب) 22.0 s ، (جـ) 30.0 μC ، (د) 1.36 A

7 $q_{2r} = 0.865 q_0$

9 156 V

11 (أ) $I_0 = 1.02$ A و $V_0 = 170$ V ، (ب) 86.4 W ،
(جـ) 167 Ω

13 13.4 Ω ، 64.5 kcal

15 320 W

17 120 W

19 12.1 Hz

21 32.0 Hz

23 0.271 A ، 452 A

25 66.5 mA

27 318 Hz

29 (أ) 10 ؛ (ب) 1000 ، (جـ) 10,000

31 (أ) 1.51 Ω ، (ب) 15.1 Ω

33 39.8 mH

35 (أ) 36.5 mH ، (ب) 120 Hz

37 4.79 A

39 (أ) 0.824 A ، (ب) 72.9 V

41 531 Hz

43 0.120 A ، 2.88 W

45 0.0500 A 128 mH

47 176 mH

49 1.89 أو 1.49 H

51 (أ) 69.0° ، (ب) التيار يسبق الجهد .

53 70.7 mH ، 194 W

55 27.4 W

57 (أ) 17.6 mF ، (ب) 1.17 mH

59 (أ) 79.6 Hz ، (ب) 1600 Ω

61 2.47 إلى 25.3 pF

63 (أ) 118 Hz ، (ب) 60.7 mA

65 (أ) 180 V ، (ب) 8.84 μF

67 182 Ω ، 0.960 H

الفصل الثاني والعشرون

1 6.00×10^{6} m

3 188 إلى 556 m

5 5.45×10^{14} Hz

7 75.0 km

9 (أ) 45.7 Nhz ، (ب) 6.57 m

11 0.4580 pF

13 (أ) 8.50 V/m ، (ب) من الكبر بحيث يقاس .

15 (أ) 5.33 pT ، (ب) من الصعب قياسه .

17 3.00×10^{8} V/m

19 $B = 2.67 \times 10^{-12} \cos(6.00 \times 10^{10} t)$ Ti ،
λ = 00314 m ، f = 9.55 GHz

21 203 μV

23 E_0 = 729 V/m ، $B_0 = 2.43 \times 10^{-6}$ T

25 E_0 = 1005 V/m ، $B_0 = 3.35 \times 10^{-6}$ T

27 $E = 5.49 \times 10^{-4} \sin(8.80 \times 10^{6} t)$ V/m
، $B = 1.83 \times 10^{-12} \sin(8.80 \times 10^{6} t)$ T

29 (أ) 3.59×10^{-8} m/s^2 W/m^2 ،
(ب) E_0 = 5.20 V/m ، $B_0 = 1.73 \times 10^{-11}$ T

31 0.368 W/m^2

33 48.6 W

35 4330 m

الفصل الثالث والعشرون

1 0.028 s

3 1.00 m

5 2.40 m/s

7 (أ) 70.0° ، (ب) 60.0°

9 12.0 ، 36.0 و 48.0 Ω

11 $\phi = 2\theta$

13 i = 13.8 cm ، I = 3.85 mm ، الصورة حقيقية ومقلوبة

15 i = −30.0 cm ، I = 6.00 cm ، الصورة تقديرية ومعتدلة

17 2.78

19 75.0 cm

21 $p = 4f$ ، الصورة حقيقية

23 p = 40.0 cm

25 (أ) 0.600 cm ، (ب) 1.15 cm ، (جـ) 1.67 cm

27 (أ) p = 40.0 cm أمام المرآة .
(ب) لا ، تقديرية وأصغر من الجسم .

29 p = 30.0 cm و m = 0.400

31 i = −24.2 cm ، خلف المرآة ، تقديرية ومعتدلة .
M = 0.0303

33 (أ) 2.21×10^{8} m/s ، (ب) λ = 433 nm
(جـ) $f = 5.08 \times 10^{14}$ Hz

35 (أ) 1.92×10^{8} m/s ، 604 nm ، (جـ) 18.7°

37 (أ) θ_2= 28.4° ، (ب) $\theta_3 = 48.0° = \theta_1$

39 $\Delta\theta$ = 0.591°

41 37.1°

43 1.56×10^{8} m/s

45 3.20 m

47 (أ) 24.4° ، (ب) 33.3°

49 46.0°

51 (أ) 40.5° ، (ب) 59.7°

53 (أ) 1.33 cm ، (ب) 8.00 cm

55 (أ) 1.80 cm ، (ب) 3.00 cm ، (جـ) 5.40 cm

57 (أ) f = −40.0 cm ، (ب) العدسة مفرقة .

59 (أ) 2.96 cm ، (ب) 2.02 cm

61 (أ) $p = 4f$ ، (ب) الصورة حقيقية ومقلوبة .

63 (أ) عدسة لامة ، (ب) $2f/3$

65 (أ) $i = -8f/9$ ، (ب) $M = 1/9$

67 (أ) i = −4.44 cm و M = 0.889
(ب) الصورة تقديرية ومعتدلة .

69 i = −11.5 cm ، I = 1.05 cm ، الصورة تقديرية ومعتدلة .

71 (أ) 101 cm ؛ (ب) 267 cm

73 53.2 cm

75 $s_i s_0 = f^2$

77 200 cm أمام المرآة ؛ والصورة النهائية حقيقية ومعتدلة .

الفصل الرابع والعشرون

1 (أ) $x = -60.0$، -120 و -180 cm
(ب) $x = -30.0$ ، -90 و -150 cm

3 80.0 m

5 $\lambda = 15.0/n$ cm

7 3000 m

9 (أ) $\theta_3 = 1.03°$ ، (ب) $\theta_5 = 1.72°$

11 (أ) 3.00 m ؛ (ب) 4.50 m

13 3.13 m

15 1.51 m

17 $y_r - y_v = 1.80$ mm

19 86.5 nm

21 $n_f = 1.86$

23 1.25 μm

25 85.9 و 258 nm

27 (أ) 4.91 μm ؛ (ب) 3.52 μm

29 179 nm

31 481 nm

33 (أ) 1.94 μm ، (ب) 77.6°

35 (أ) 3.97° ؛ (ب) 9.41°

37 20.7°

39 14.3° ، 29.5° و 47.6

41 0.255°

43 5.89 mm

45 1.20 mm

47 5.60×10^{-5} m

49 $I = 0.413 I_0$

51 $I_0 = 1.70 I$

53 $\theta_B = 57.0°$

55 $\cot \theta_B = \sin \theta_c$

57 $\theta_2 = 31.7°$

59 (أ) 448 nm ، (ب) كما في الجزء (أ) .

61 (أ) 295 ؛ 590 و 885 nm
(ب) 222 ؛ 444 و 666 nm

63 6.56 cm

الفصل الخامس والعشرون

1 3.75 mm

3 34.6 cm

5 80.0 cm

7 من 20.7 إلى 19.6 cm

9 84.0 cm

11 120 cm من الكاميرا .

13 (أ) 7.00 cm ، (ب) 0.170 cm

15 1/25

17 $f = 6.25$ cm

19 3.125

21 (أ) $i = 40.0$ cm ؛ (ب) الصورة تقديرية .

23 3.81 cm

25 $M = 113$

27 (أ) $p_0 = 10.0$ cm ؛ (ب) $M = 12.5$

29 $H_\phi = 20.0$

31 $H_\phi = 11.0$

33 $H_\phi = 24.0$

35 20.6°

37 1.60 دقيقة

39 $\Delta r = 0.193°$

45 (أ) $r_1 = 40.7°$ ، (ب) $D = 40.9°$

47 (أ) قصر النظر ، (ب) $f = -37.5$ cm

49 $2\theta = 2.47°$

51 (أ) $I_2 = 25.0 I_1$ ، $I_2/I_1 = 6.25$

53 $i_e = -60.0$ cm أمام العين ؛ الصورة تقديرية ومعتدلة .
$M = 1.33$

الفصل السادس والعشرون

1 أسفل الوضع الأصلي مباشرة

3 1.70 m/s و 0.700 m/s

5 (أ) 1.20 m/s ، (ب) 4.00 m/s

7 0.962 c

9 (أ) 67 نبضة في الدقيقة ، (ب) 32.2 نبضة في الدقيقة

11 0.943 c

13 (أ) 960 يومًا ، (ب) 2.20×10^3 يومًا .

15 2.92×10^{-9} s

17 6.05 m

19 1.58 m

21 (أ) 3.77×10^7 s ، (ب) 2.05×10^7 s

23 $5.00\,(1 - 4.29 \times 10^{-16})$ m

25 $0.999\,c$

27 (أ) $0.0342c$ ، (ب) $0.328c$

29 $0.9938c$

31 (أ) 9.00×10^{16} J ، (ب) 1.20×10^{14} s

33 6.36×10^{-12} J ، هذا لا يمكن اكتشافه .

35 (أ) 2.48×10^{-5} eV ، (ب) 1.30 eV ، (جـ) 2.53 eV
(د) 124 eV

37 (أ) 3.17×10^{4} nm ، (ب) تحت الحمراء .

39 4.67×10^{-20} m

41 2.87 eV

43 (أ) 262 nm ، (ب) فوق البنفسجية .

45 7.16×10^{5} m/s

47 (أ) $\phi = 2.97$ eV ، (ب) $f_0 = 6.18 \times 10^{14}$ Hz

49 (أ) $\lambda = 163$ nm ، (ب) 1.84×10^{15} Hz ،
(جـ)

51 (أ) 1.36×10^{-27} N.s ، (ب) 2.73×10^{-27} N.s

53 3.22×10^{6} m/s

55 (أ) 0.80243 nm ، (ب) 1.17×10^{-24} kg.m/s

57 3.54×10^{-11} m

59 1.24×10^{-38} m

61 41.9 mV

63 (أ) 6.23 nm . (ب) 17937° C

65 (أ) 1.06 ، 0.530 و 0.353 nm
(ب) 1.34 ، 5.37 و 12.1 eV

67 3.07×10^{-10} m

69 5.74×10^{-20} J ، 0.359 eV

71 0.117 eV

73 (أ) 9.95×10^{-26} kg ، (ب) 1.09×10^{6} m/s

75 $\Delta p = 1.06 \times 10^{-20}$ kg.m/s ، $\Delta E = 416$ keV

77 3.30×10^{-7} eV

79 9410

81 (أ) 2.05×10^{8} s ، (ب) 1.46×10^{8} s
(جـ) 3.07×10^{16} m ، (د) 2.10×10^{6} m/s

83 $0.125c$

الفصل السابع والعشرون

1 125 m

3 (أ) 3.27×10^{-25} kg ، (ب) 4.74×10^{-14} m

5 2.82×10^{-14} m

7 $r_1 = 5.30 \times 10^{-11}$ nm ، $r_2 = 2.12 \times 10^{-12}$ nm ،
$r_3 = 4.77 \times 10^{-10}$ nm

9 $v_1 = 0.00729$ ، $v_2 = 0.00365c$

11 13.6 و 3.40 eV

13 $r_1 = 2.65 \times 10^{-11}$ m ، $r_2 = 1.06 \times 10^{-10}$ m

15 (أ) -84.9 eV ، (ب) $r_1 = 6.71 \times 10^{-11}$ m

17 (أ) -122 ، -20.6 و -13.6 eV ، (ب) 122 eV

19 1646 eV

21 $\lambda_{13}/\lambda_{14} = 1.002$

23 $\lambda_a = 820$ nm و $\lambda_l = 1875$ nm

25 2.86 eV

27 سلسلة ليمان : 122، 102 و 97.2 nm
سلسلة بالمر: 656 و 486 nm
سلسلة باشن : 1875 nm

29 30.4 ، 25.6 و 24.3 nm

31 3.62 eV

33 سلسلة ليمان : 122، 102 و 96.9 ، 94.7 و 93.8 nm
سلسلة بالمر : 656 ، 486 ، 434 و 410 nm
سلسلة باشن: 1880 ، 1280 و 1095 nm ، 4050 و 2627 ، و 7470 nm

35 (أ) 18 ، (ب) 50

37 ثلاثة قيم $l = 0, 1, 2$

39 3 ، 6

41 (أ) 18 ، (ب) 32 ، (جـ) 50

43 9

49 6.74 pm

51 (أ) 45.8 eV ، (ب) 0.0226 nm

53 (أ) 0.0184 nm ، (ب) 0.0786 nm

55 $\Delta E = 3142$ eV ، $\lambda = 0.395$ nm

57 8.58 cm

59 2.54×10^{74}

61 (أ) الانتقال من $n = 7$ إلى $n = 4$
(ب) من $n = 1$ إلى $n = 4$

63 تنتمي أدنى ثلاث طاقات ممتصة للأطوال الموجية 193 ، 72.5 ، 38.6 nm في المدى فوق البنفسجي ولهذا فالبنزين سائل رائق .

الفصل الثامن والعشرون

1 (أ) $Z = 7$ ، (ب) $N = 7$ ، (جـ) $R = 2.89 \times 10^{-15}$ m ،
(د) $\rho = 2.29 \times 10^{17}$ kg/m^3

3 $^{43}_{20}$Ca

5 ألومنيوم 27

7 191 m

9 0.452 m

11 1.99 u

13 11.5 cm

15 39.1 kg/mol

17 ^{238}U : 99.3% ، ^{238}U : 0.700%

19 0.945 بالمائة .

21 7.68 MeV لكل نوية .

23 10.84 MeV

25 274.91 MeV و 302.40 MeV

27 42.4 عدة في الدقيقة .

29 (أ) $2.61 \times 10^{-8}\ s^{-1}$ ، (ب) 1.41×10^{7} نواة .

31 1.01×10^{9} تفتت في الدقيقة .

33 175 pCi

35 1.00 h

37 8.46 h

39 1.24×10^{3} Bq

41 يورانيوم 233 ، هليوم 4 ، نيوديميوم 144

43 بزموت 209 ، فرانشيوم 223

45 2.64×10^{-4} بالمائة

47 230.03321 u

49 0.090 MeV هي طاقة حركة الثوريوم .

51 لا ، يحتاج البروتون طاقة حركة مقدارها 3.00 MeV

53 الطاقة المشرفية 2.64 MeV

55 (أ) 5.75×10^{14} J ، (ب) 1.83×10^{11} C°

57 ثوريوم 230 ، راديوم 226 ، رادون 222 ، بولونيوم 218 و رصاص 214

59 (أ) 98.5 mCi ، (ب) 1.63×10^{-12} g

61 2.09×10^{-8} g

63 0.243 μg

65 1038 Gy

67 2.50×10^{4} yr

69 47.5 yr

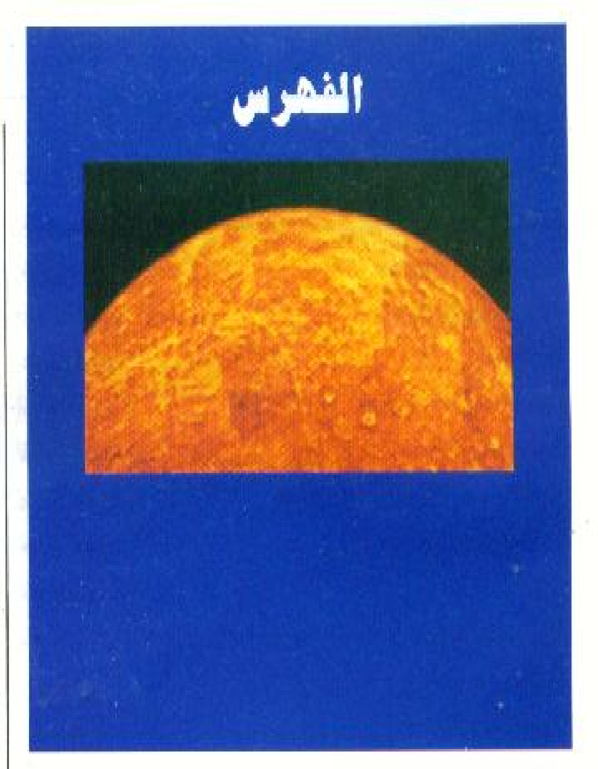
71 (أ) 8.60×10^{10} J ؛ (ب) $1911

73 28.321 kg

75 $v = 0$ ؛ $v = 9.89 \times 10^{6}$ m/s

75 4.03 MeV ؛ 18.4 MeV

الفهرس



الفصل الأول

أبعاد	Dimensions
إزاحة	Displacement
إزاحة محصلة	Resultant Displacement
تجريب	Experimentation
تناسب تربيعى	Quadratic Proportionality
تناسب تربيعى عكسى	Inverse Quadratic Proportionality
تناسب خطى (طردى)	Linear Proportionality
تناسب عكسى	Inverse Proportionality
حد الضباطة	Limit of Precision
خاصية	Property
خطأ	Error
خطأ إحصائى	Statistical Error
خطأ رتيبى	Systematic Error
خطأ عشوائى	Random Error
دالة	Function
دالة مثلثية	Trigonometric Function
درجة	Degree
دقة	Accuracy
رسم بيانى المتجهات	Vector Diagram
رقم معنوى	Significant Digit
رقيقة دوائر متكاملة	Integrated Chip
زاوية نصف قطرية (Rad)	Radian (Rad)
السببية	Causality
سرعة	Velocity
سلج (وحدة الكتلة فى النظام البريطانى)	Slug
الشدة الضيائية	Luminous Intensity
شكل رياضى	Mathematical Form
ضباطة	Precision
ضباحة حدية	Limiting Precision
ضبيط ـ مضبوط	Precise
الطريقة العلمية	Scientific Method
غير دقيق	Inaccurate
قابل للاستعادة	Reproducible
قابلية الاستعادة	Reproducibility
قانون الجيوب	Law of Sines
قانون جيوب التمام	Law of Cosines
قانون فيزيائى	Physical Law
قانون كمى	Quantitative Law
كاندلا ، قنديلة	Candela
كمية جوهرية	Essential Quantity
كمية قياسية	Scalar Quantity
كمية متجهة	Vector Quantity
لابعدى	Dimensionless
مبدأ أساسى	Basic Principle
متجه	Vector
مركبة	Component
مركبة متعامدة	Rectangular Component
معادلة تربيعية (من الدرجة الثانية)	Quadratic Equation
معادلة خطية (من الدرجة الأولى)	Linear Equation
معامل تحويل	Conversion Factor
معدل الحركة ، مقدار السرعة	Speed
مقدار	Magnitude
النظام العالمى للوحدات (SI)	International System of Units
نظرية	Theory
وحدات	Units
الوحدات SI المشتقة	Derived SI Units

الفصل الثانى

تصادم	Collision
تصادم مستقيم	Head-On Collision
تقاصر (عجلة سالبة)	Deceleration
حركة فى بعد واحد (خطية)	One-Dimensional Motion
حركة فى بعدين (مستوية)	Two- Dimensional Motion
الديناميكا	Dynamics
زمن الطيران	Time of Flight
حركة مقذوف	Projectile Motion
سرعة لحظية	Instantaneous Velocity
سرعة متوسطة	Average Velocity

Relative Velocity	سرعة نسبية
Free Fall	سقوط حر
Acceleration	عجلة (تسارع)
Acceleration due to Gravity	عجلة الجاذبية
Negative Acceleration	عجلة سالبة (تقاصر)
Uniform Acceleration	عجلة منتظمة
Kinematics	الكينماتيكا
Average Speed	متوسط مقدار السرعة
Range	مدى
Projectile Trajectory	مسار المقذوف
Trajectory Equation	معادلة المسار
Projectile	مقذوف
Tangent	مماس
Slope	ميل

الفصل الثالث

Friction	احتكاك
Static Friction	احتكاك استاتيكى
Sliding Friction	احتكاك انزلاقى
Dynamic Friction	احتكاك ديناميكى
Atood's Machine	آلة أتوود
Weightlessness	انعدام الوزن
Pulley	بكرة
Compression	تضاغط . انضغاط
Gravity	جاذبية
Gravitation	جذب . جاذبية
Free Body	جسم حر
Reaction	رد فعل
Angle of Repose	زاوية السكون
Spring	زنبرك
Net Force	صافة (محصلة) القوة
Massless	عديم الكتلة
Action	فعل
Inertia	القصور الذاتى
Action-Reaction Law	قانون الفعل ورد الفعل
Newton's Laws of Motion	قوانين نيوتن للحركة
Force	قوة
Friction Force	قوة احتكاك ؛ قوة احتكاكية
Reaction Force	قوة رد الفعل
Normal Force	قوة عمودية
Action Force	قوة الفعل
Limiting Value	قيمة حدية
Mass	كتلة
Rest Mass	كتلة السكون ، الكتلة السكونية
Frictionless	لا احتكاكى ، عديم الاحتكاك
Principle of Inertia	مبدأ القصور الذاتى
Free-Body Diagram	المخطط البيانى للجسم الحر
Incline	مستوى مائل
Coefficient of Friction	معامل الاحتكاك
Static Coefficient of Friction	معامل الاحتكاك الاستاتيكى
Kinetic Coefficient of Friction	معامل الاحتكاك الحركى
Linear Acceleration	معجل خطى
Relativistic	نسبوى
Theory of Relativity	نظرية النسبية
Weight	وزن
Apparent Weight	وزن ظاهرى

الفصل الرابع

Equilibrium	اتزان ؛ توازن
Static Equilibrium	اتزان (توازن) استاتيكى
Line of Force	خط عمل القوة
Lever Arm	ذراع الرافعة
Moment Arm	ذراع العزم
Lever	رافعة
Perspective View	شكل منظورى ـ منظور
Net Torque	صافى عزم الدوران
Moment	عزم
Torque	عزم الدوران
Moment of The Force	عزم القوة
Tangential Force	قوة ماسية
Axis of Rotation	محور الدوران
Center of Gravity	مركز الثقل

الفصل الخامس

Erg	إرج (وحدة طاقة)
Elecronvolt (eV)	إلكترون فولط (وحدة طاقة)
Simple Machine	آلة بسيطة
Nuclear Fusion	اندماج نووى
Nuclear Fission	انشطار نووى
Conservation of Energy	بقاء (أو حفظ) الطاقة
Pulley System	بكّارة
Gravitational	تثاقلى ، جذبى
Perpetual Oscillation	تذبذب دائم
Elementary Particle	جسيم أولى

English	العربية
Joule (J)	جول (وحدة طاقة)
Load	حمل
Work Output	خرج الشغل
Power Output	خرج القدرة
Perpetual	دائم ، أبدى
Work Input	دخل الشغل
Power Input	دخل القدرة
Work	شغل
Energy	طاقة
Binding Energy	طاقة ترابط (ارتباط)
Potential Energy	طاقة الجهد
Gravitational Potential Energy (GPE)	طاقة الجهد التثاقلي (طاقة الوضع)
Elastic Potential Energy	طاقة الجهد المرن
Thermal Energy	طاقة حرارية
Kinetic Energy	طاقة حركة ، طاقة حركية
Mass Energy	طاقة كتلية
Electrical Energy	طاقة كهربائية
Chemical Energy	طاقة كيميائية
Mechanical Energy	طاقة ميكانيكية
Nuclear Energy	طاقة نووية
Wheel And Axle	العجلة ومحور العجلة
Mechanical Advantage	فائدة ميكانيكية
Actual Mechanical Advantage (AMA)	الفائدة الميكانيكية الفعلية
Ideal Mechanical Advantage (IMA)	الفائدة الميكانيكية المثالية
Matter-Antimatter Annihilation	فناء المادة وضديد المادة
Conservation Law	قانون بقاء (حفظ)
Law of Conservation of Energy	قانون بقاء الطاقة
Power	قدرة
Horsepower (Hp)	قدرة حصانية (وحدة طاقة)
Power Rating	قدرة مقدرة (تقديرية)
Foot Pound (Ft - Lb)	قدم ، باوند (وحدة طاقة)
Nonconservation Force	قوة غير محافظة (غير احتفاظية)
Conservation Force	قوة محافظة (احتفاظية)
Elastic Force	قوة مرنة
Point Mass	كتلة نقطية
Efficiency	كفاءة
Kilowatt (Kw)	كيلو واط (وحدة قدرة)
Kilowatt-Hour (Kwh)	كيلو واط . ساعة (وحدة طاقة)
Pivot	محور ارتكاز ، نقطة ارتكاز
Fulcrum	مرتكز ، نقطة ارتكاز
Center of Mass	مركز الكتلة
Geometric Center	مركز هندسى
Reference Level	مستوى إسناد (مرجعى)
Rate	معدل
Work-Energy Theorem	نظرية الشغل والطاقة
Extended Work-Energy Theorem	نظرية الشغل والطاقة الموسعة
Apogee	نقطة الأوج (أبعد نقطة عن الأرض)
Perigee	نقطة الحضيض (أقرب نقطة من الأرض)
Watt	واط (وحدة قدرة)

الفصل السادس

English	العربية
Scattering	استطارة - تبعثر
Ballistic Pendulum	بندول قذفي
Inelastic Collision	تصادم غير مرن
Elastic Collision	تصادم مرن
Impulse	دفع (القوة)
Jet Propulsion	دفع نفثى
Recoil Velocity	سرعة الارتداد
Pressure	ضغط
Wavelength	الطول الموجى ، طول الموجة
Compton Effect	ظاهرة (تأثير) كومتون
Photoelectric Effect	الظاهرة الكهروضوئية
Law of Conservation of Linear Momentum	قانون بقاء كمية التحرك الخطى
Momentum	كمية التحرك
Linear Momentum	كمية التحرك الخطى
Rocket Engine	محرك صاروخى

الفصل السابع

English	العربية
Angular Displacement	إزاحة زاوية
Event Horizon	أفق الحدث
Curvature	انحناء
Satellite	تابع أرضى ، قمر صناعى
Gravitational Constant	ثابت الجاذبية
Black Hole	ثقب أسود
Orbital Motion	حركة مدارية
Geodesics	خطوط جيوديسية (مستقيمة)
Great Circle	الدائرة العظمى
Degree (Deg)	درجة (وحدة)
Period	دورة ، الزمن الدورى
Revolution (Rev)	دورة (Rev)
Orbital Time	زمن مدارى

سرعة زاوية	Angular Velocity
سرعة مماسية	Tangential Velocity
عجلة زاوية	Angular Acceleration
عجلة مماسية	Tangential Acceleration
عجلة نصف قطرية	Radial Acceleration
كوكب	Plant
كوكبى	Planetary
كمية مماسية	Tangential Quantity
قانون الجاذبية العام	Universal Law of Gravitation
قوة تجاذبية	Attractive Force
قوة جاذبة مركزية	Centripetal Force
قوة طاردة مركزية	Centrifugal Force
مدار ـ فلك	Orbit
مسافة زاوية	Angular Distance
مماس	Tangential
ميزان كافنديش	Cavendich Balance
ميون (جسيم دقيق مشحون)	Moun
نيوترينو (جسيم دقيق مشحون)	Neutrino

الفصل الثامن

إهليلجى ، ناقصى (على شكل قطع ناقص)	Elliptical
تكمية	Quantization
مكماة (تتبع قوانين الكم)	Quantized
ثابت بلانك (h)	Planck's Constant (h)
جيروسكوب	Gyroscope
ربطة ، حزمة	Packet
طاقة حركة انتقالية	Transnational Kinetic Energy
طاقة حركة دورانية	Rotational Kinetic Energy
طوق ، طارة	Hoop
عزم القصور الذاتى	Moment of Inertia
قاعد اليد اليمنى	Right Hand Rule
قانون بقاء كمية التحرك الزاوى	Law of Conservation of Angular Momentum
قدرة ؛ مقدرة	Rated Power
قصور ذاتى انتقالى	Transnational Inertia
قصور ذاتى دورانى	Rotational Inertia
قطع ناقص	Ellipse
كم (أصغر وحدة للكمية الفيزيائية)	Quantum
كمية التحرك الدورانى	Rotational Momentum
كمية التحرك الزاوى	Angular Momentum
كوارك	Quark
مغزلية	Spin
ميكانيكا الكم	Quantum Mechanics
نصف قطر التدويم	Radius of Gyration
نظرية المحور الموازى	Parallel-Axis Theorem

الفصل التاسع

إجهاد	Stress
إجهاد تضاغطى (تضاغط)	Compressional Stress
إجهاد طولى	Longitudinal Stress
إجهاد قص (قصى)	Shear Stress
استطالة	Elongation
اضطراب	Turbulence
انسياب ؛ تدفق ، دفق	Flow
انسياب (تدفق) طبقى	Laminar Flow
انسياب (تدفق) مضطرب	Turbulent Flow
انضغاطية حجمية	Bulk Compressibility
انفعال	Strain
انفعال شد	Tensile Strain
انفعال قصى	Shear Strain
بار (وحدة ضغط)	Bar
باومتر (جهاز قياس الضغط الجوى)	Barometer
باسكال Pa (وحدة ضغط)	Pascal (Pa)
بواز (وحدة لزوجة)	Poise (P)
بوازيل (وحدة لزوجة)	Poiseuille (Pl)
تشوه	Distortion
تور (وحدة ضغط)	Torr
جاسىء ، صلب	Rigid
جامد أمورفى (غير بلورى)	Amorphous Solid
جامد بلورى	Crystalline Solid
جانبية السرعة	Velocity Profile
جساءة ، جسوءة ، صلابة	Rigidity
حد المرونة ؛ الحد المرن	Elastic Limit
خط انسياب (تدفق)	Flow Line
ذبذبة	Oscillation
زاوية القص	Terminal of Shear
سرعة نهائية	Terminal Velocity
سنتى بواز (وحدة لزوجة)	Centipoise (cp)
ضغط تفاضلى	Pressure Differential
ضغط مطلق	Absolute Pressure
طفو	Buoyancy
عدد رينولدز	Reynold's Number
غير قابل للانضغاط	Incompressible
قانون بوازيل	Poiseuille's Las

قانون ستوكس	Stock's Law
قانون القياس النسبى	Scaling Law
قانون هوك	Hooke's Law
قص	Shear
قوة الطفو	Buoyant Force
قوة القص ، قوة قاصة	Shear Force
قوة مثبطة (معوقة)	Retarding Force
قوة المقاومة الـهوائية	Drag Force
كثافة	Density
لاانضغاطية (عدم قابلية الانضغاط)	Incompressibility
لزوجة	Viscosity
ماكروسكوب ، عيانى	Macroscopic
مانومتر (جهاز قياس ضغط الغازات)	Manometer
مائى (سائل أو غاز)	Fluid
مبدأ أرشميدس	Archimede's Principle
مدلول ضغط المقياس	Gauge Pressure
مرونة	Elasticity
مساحة أمامية	Frontal Area
معادلة برنولى	Bernoulli's Equation
معامل المرونة	Elastic Modulus
معامل المرونة الحجمية	Bulk Modulus
معامل المرونة القضية ، معامل القص	Shear Modulus
معامل مقاومة الهواء	Drag Coefficient
معامل يونج	Young's Modulus
معدل الانسياب	Flow Rate
معدل (سرعة) الترسيب	Sedimentation Rate
معدل القص	Shear Rate
المقاومة النهائية (القصوى)	Ultimate Strength
مقياس ضغط	Pressure Gauge
ميللى بوازيل (وحدة لزوجة)	Millipposeuille (mpl)
ميكروسكوبى ، مجهرى	Microscopic
نظرية تورشيللى	Torricelli's Theorem
نفق رياح	Wind Channel
نقطة الخضوع (الاستسلام)	Yield Point
نقطة الكسر	Breaking Point
الوزن النوعى ، الكثافة النسبية	Specific Gravity

الفصل العاشر

اتزان حرارى	Thermal Equilibrium
ازدواج حرارى	Thermocouple
توزيع ماكسويل	Maxwell Distribution
ثابت بولتزمان	Boltzmann's Constant
ثابت الغازات	Gas Constant
جذر توسط مربع السرعة	Root Mean Square (rms) Speed
سَدُود للغاز	Gas Tight
السرعة الأكثر احتمالا	Most Probable Speed
السرعة المتوسطة	Average Velocity
الصفر المطلق	Absolute Zero
ضغط بارومترى	Barometric Pressure
عدد أفوجادرو	Avogadro's Number
غاز حقيقى	Real Gas
غاز مثالى	Ideal Gas
قانون جاى ـ لوساك	Gay - Lussac's Law
قانون شارل	Charle's Law
القانون الصفرى للديناميكا الحرارية	Zeroth Law of Thermodynamics
قانون الغاز المثالى	Ideal-Gas Law
الكتلة الجزيئية	Molecular Mass
الكتلة الذرية	Atomic Mass
كيلو مول	Kilomole (Kmol)
مقياس سلزيوس	Celsuis Scale
مقياس فهرنهيت	Fahrenheit Scale
المقياس المئوى	Centigrade Scale
مقياس كلفن (المقياس المطلق)	Kelvin Scale
المقياس المطلق	Absolute Scale
مول (جزئ واحد)	Mole (mol)
نظرية الحركة للغازات	Kinetic Theory of Gases

الفصل الحادى عشر

ابتعاثية ، مبتعثية	Emissivity
اشعاع	Radiation
امتصاصية	Absorptivity
انتقال الحرارة ، انتقال حرارى	Heat Transfer
انصهار	Fusion
بخار مشبع	Saturated Vapour
تبخر ، تصعيد	Evaporation
تبخير	Vaproization
تدرج درجة الحرارة	Temperature Gradient
تسامى	Sublimation
تغير الطور	Change of Phase
تمدد حرارى	Thermal Expansion
توصيل حرارى	Thermal Conduction
تيار الحمل	Convection Current
ثابت ستيفان ـ بولتزمان	Stefan-Boltzmann Constant

جسم أسود	Black Body
حرارة الانصهار	Heat of Fusion
حرارة التبخير	Heat of Vaporization
حرارة التسامى	Heat of Sublimation
الحرارة الكامنة	Latent Heat
حرارة نوعية	Specific Heat
حركة حرارية	Thermal Motion
حمل	Convection
رابطة	Bond
رابطة كيميائية	Chemical Bond
رسم بيان الطور	Phase Diagram
سُعر	Calorie (cal)
سُعر غذائى	Food Calorie
سعة حرارية	Heat Capacity
السعة الحرارية النوعية	Specific Heat Capacity
ضغط البخار	Vapour Pressure
ضغط مشبع	Saturated Pressure
طاقة اشعاعية	Radiant Energy
طاقة اهتزازية	Vibrational Energy
طاقة حرارية	Thermal Motion
عازل	Insulator
غاز أحادى الذرة	Monatomic Gas
غاز ثنائى الذرة	Diatomic Gas
قانون ستيفان	Stefan's Law
قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)	Calometry
القيمة R	R-Value
كالوريك (السيال الحرارى)	Caloric
كيلو سعر (سعر كبير)	Kilocalorie(kcal)
مُسْعِر	Calorimeter
معامل التمدد الحجمى	Volume Expansion Coefficient
معامل التمدد الحرارى الحجمى	Coefficient of Volume Thermal Expansion
معامل التمدد الحرارى الطولى	Coefficient of Linear Thermal Expansion
معامل التمدد الطولى	Linear Expansion Coefficient
مقاومة حرارية	Thermal Resistance
المكافئ الميكانيكى للحرارة	Mechanical Equivalent of Heat
منحنى الانصهار	Fusion Curve
منحنى التبخير	Vaporization Curve
منحنى التسامى	Sublimation Curve
موصل	Conductor
موصلية حرارية	Thermal Conductivity
النقطة الثلاثية	Triple Point
نقطة التجمد	Freezing Point
وحدة حرارية	Thermal Unit
وحدة حرارية بريطانية (و.ح.ب)	British Thermal Unit (Btu)

الفصل الثانى عشر

آلة حرارية (محرك حرارى)	Heat Engine
إنتروبيا	Entropy
أيسوثرم (منحنى أيسوثرمى)	Isotherm
تمدد حر	Free Expansion
دالة حالة	State Function
دورة ديناميكية حرارية	Thermodynamic Cycle
حالة ديناميكية حرارية	Thermodynamic State
الحرارة النوعية الجزيئية (المولارية)	Molar Specific Heat
خزان حرارى	Heat Reservoir
رسم بيانى PV	PV Diagram
عملية	Process
عملية أدياباتية	Adiabatic Process
عملية أيسوبارية (ثابتة الضغط)	Isobaric Process
عملية أيسوثرمية (ثابتة درجة الحرارة)	Isothermal Process
عملية أيسوكورية (ثابتة الحجم)	Isochoric Process
عملية تخفيف الضغط بالخنق	Throttling Process
عملية ثابتة الحجم	Isovolumetric Process
القانون الأول للديناميكا الحرارية	First Law of Thermodynamics
متغيرات الحالة	State Variables
نظام ديناميكى حرارى	Thermodynamic System
نظرية التقسيم المتساوى	Equipartition Theorem
الوسط المحيط	Surroundings

الفصل الثالث عشر

اتساع الذروة	Peak Width
احتمالية ، احتمال	Probability
انحراف متوقع	Expected Deviation
انعكاسى	Reversible
حالة ماكروئية (كلية)	Macroscopic State
حالة ميكروئية (مجهرية)	Microscopic State
حرارة الاحتراق	Heat of Combustion
دورة تبريد	Refrigeration Cycle
صمام خنق	Throttling Valve
عادم حرارى	Heat Exhaust
فوضى ، لا نظام	Disorder

English	العربية
Second law of Thermodynamics	القانون الثانى للديناميكا الحرارية
Efficiency	كفاءة
Maximum Efficiency	الكفاءة القصوى
Tail Pipe	ماسورة السحب (شكمان)
Evaporator	مبخر
Steam Engine	محرك بخارى
Heat Engine	محرك حرارى
Carnot Engine	محرك كارنو
Heat Pump	مضخة حرارية
Coefficient of Performance (COP)	معامل الآداء
Order	نظام
Refrigeration System	نظام (أو جهاز) تبريد

الفصل الرابع عشر

English	العربية
Vibration	اهتزاز ، اهتزازاة
Forced Vibration	اهتزازى قسرى
Damped Vibration	اهتزاز متضائل (مخمد)
Antinode	بطن (موجى)
Frequency	تردد
Fundamental Frequency	تردد أساسى
Resonance Frequency	التردد الرنينى ، تردد الرنين
Harmonic	توافقية
Spring Constant	ثابت الزنبرك
Force Constant	ثابت القوة
Critically Damped	حرج المضاءلة (التخميد)
Simple Harmonic Motion (SHM)	حركة توافقية بسيطة
Sinusoidal Motion	حركة جيبية
Periodic Motion	حركة دورية
Wave Motion	حركة موجية
Reference Circle	دائرة الإسناد
Vibration Cycle	دورة اهتزاز
Oscillation	ذبذبة
Resonance	رنين
Overdamped	زائد المضاءلة (التخميد)
Wave Speed	سرعة الموجة ، السرعة الموجية
Amplitude	سعة
Elastic Potential Energy	طاقة الجهد المرن
Phase	طور
Wavelength	طول الموجة ، الطول الموجى
Mode	عقدة (موجية)
Wave Crest	قمة موجية ، قمة الموجة
Wave Trough	قاع موجى ، قاع الموجة
Stiffness	كزازة ، تيبس
Principle of Superposition	مبدأ التراكب
In Phase	متطاور (متفق الطور)
Out of Phase	متفاوت الطور
Wave	موجة
Compressional Wave	موجة تضاغطية
Resonance Wave	موجة رنينية
Longitudinal Wave	موجة طولية
Transverse Wave	موجة مستعرضة
Standing Wave	موجة مستقرة (موقوفة)
Vibrator	مهتز
Pulse	نبضة
Hertz (Hz)	هرتز (وحدة التردد)

الفصل الخامس عشر

English	العربية
Frequency Response	استجابة ترددية
Bel (B)	بل (وحدة ضوئية)
Rarefaction	تخلخل
Interference	تداخل
Constructive Interference	تداخل بنائى
Destructive Interference	تداخل هدمى
Beat Frequency	تردد الضربات
Wavefront	جبهة موجية ، جبهة موجية
Loudness	جهارة
Sound Pitch	درجة الصوت
Sonic Boom	دوى اختراق حاجز الصوت
Decibel (db)	ديسيبل (وحدة صوتية)
Diaphragm	رق ، غشاء
Frequency Shift	زحزحة ترددية (زحزحة التردد)
Supersonic Speed	سرعة فوق صوتية
Intensity	شدة
Ray	شعاع
Infrasound	صوت تحت سمعى
Ultrasound	صوت فوق سمعى
Beats	الضربات
Doppler Effect	ظاهرة دوبلر
Harmonic Number	عدد توافقى
Mach Number	العدد الماخى
Path Difference	فرق المسار
Inverse Square Law	قانون التربيع العكسى
Threshold of Pain	مبدى الألم

Threshold of Hearing	مبدى السمع
Loudspeaker	مجهار (مكبر الصوت)
Intensity Level	مستوى الشدة
Sound Level	مستوى الصوت
Point Source	مصدر نقطى
Ultrasonic Waves	موجات فوق سمعية
Shock Wave	موجة صدمية
Sound Wave	موجة صوتية
Spherical Wave	موجة كروية
Conical Wave	موجة مخروطية
Plane Wave	موجة مستوية
Tone	نغمة
Overtone	نغمة توافقية
Sound Quality	نوعية الصوت

الفصل السادس عشر

Charging By Induction	الشحن بالحث (بالتأثير)
Charging By Conduction	الشحن بالتوصيل
Grounded	مؤرض (متصل بالأرض)
Law of Conservation of Charge	قانون بقاء الشحنة
Coulomb's Law	قانون كولوم
Quantum	كم (أو كمة)
Test Charge	شحنة اختبار
Electric Field Strength	شدة المجال الكهربى
Lines of Electric Field	خطوط المجال الكهربى
Electric Flux	الفيض الكهربى
Gauss's Law	قانون جاوس
Electrostatic Condition	الشرط الكهروستاتيكى

الفصل السابع عشر

Electric Potential	الجهد الكهربى
Volt	الفولت
Voltage Difference-Voltage	فرق الجهد ـ الفولطية
Equipotential Line	خط تساوى الجهد
Electromotive Force (E.M.F)	القوة الدافعة الكهربية (ق.د.ك)
Absolute Potential	الجهد المطلق
Capacitor	المكثف
Capacitance	السعة
Dielectrics	العوازل (العازلات) الكهربية
Dipole	ثنائى القطب
Dielectric Constant	ثابت العزل
Parallel Connection	التوصيل على التوازى
Series Connection	التوصيل على التوالى

الفصل الثامن عشر

Electric Current	التيار الكهربى
Resistor	مقاوم
Ohm's Law	قانون أوم
Resistivity	المقاومية
Kirchhoff's Junction Rule	قاعدة النقطة لكيرتشوف
Circuit Analysis	تحليل الدائرة
Kirchhoff's Loop Rule	قاعدة العروة لكيرتشوف
Super conduction	التوصيل الفائق

الفصل التاسع عشر

Magnetic Field	المجال المغناطيسى
Right-Hand Rule	قاعدة اليد اليمنى
Cyclotron	السيكلوترون
Hall Effect	أثر « هول »
Solenoid	ملف لولبى
Ampere's Law	قانون أمبير
Magnetic Moment	العزم المغناطيسى
Galvanometer	جلفانومتر
Ammeter	أميتر
Voltmeter	فولتميتر
Domain	نطاق
Electromagnet	مغناطيس كهربى
Relative Magnetic Permeability	إنفاذية مغناطيسية نسبية
Curie Temperature	درجة حرارة « كورى »

الفصل العشرون

Primary Coil	الملف الابتدائى
Secondary Coil	الملف الثانوى
Induced Emf	ق.د.ك المستحثة
Magnetic Flux	الفيض (التدفق) المغناطيسى
Faraday's Law	قانون فارادای
Magnetic Induction	الحث المغناطيسى
Lenz's Law	قانون لنز
Mutual Inductance	المحاثة المتبادلة
Self Inductance	المحاثة الذاتية
Inductive Time Constant	الثابت الزمنى الحثى
Alternating Voltage Generator	مولد الجهد المتردد
Electric Motor	محرك كهربى
Transformer	محول

الفصل الحادى العشرون

English	العربية
Exponential Decay Curve	منحنى الاضمحلال الأسى
Capacitive Time Constant	الثابت الزمنى السعوى
Capacitive Reactance	الرد السعوى
Inductive Reactance	الرد الحثى
Impedance	المعاوقة
Resonance Frequency	تردد الرنين

الفصل الثانى والعشرون

English	العربية
Electromagnetic Waves	الموجات الكهرومغناطيسية
Electromagnetic Wave Spectrum	طيف الموجات الكهرومغناطيسية
Microwaves	الموجات الميكروئية (الدقيقة)
Infrared Waves	الموجات تحت الحمراء
Visible Light	الضوء المرئى
Ultraviolet Waves	الموجات فوق البنفسجية
X-Rays	أشعة إكس
Gamma Rays	أشعة جاما
Reception	استقبال
Solar Constant	الثابت الشمسى
Luminosity	الضيائية

الفصل الثالث العشرون

English	العربية
Reflection of Light	انعكاس الضوء
Plane Mirrors	المرايا المستوية
Virtual Image (Imaginary Image)	الصورة التقديرية
Focus-Focal Point	البؤرة ، النقطة البؤرية
Focal Length	البعد البؤرى
Ray Diagrams	رسم مسار الأشعة
Real Image	صورة حقيقية
Object Distance	بعد الجسم
Image Distance	بعد الصورة
Mirror Equation	معادلة المرآة
Magnification	التكبير
Refraction	الانكسار
Index of Refraction	معامل الانكسار
Snell's Law	قانون « سنل »
Total Internal Refraction	الانعكاس الداخلى الكلى
Converging Lens	عدسة مجمعة ـ لامة
Diverging Lens	عدسة مفرقة
Thin Lens Equation	معادلة العدسة الرقيقة

الفصل الرابع والعشرون

English	العربية
Huygens Principle	مبدأ هايجنز
Interference	التداخل
Constructive Interference	التداخل البُناء
Destructive Interference	التداخل الهدَّام
Fringes	هدبات
Double Slit	شق مزدوج
Interferometer	مقياس التداخل
Equivalent Optical Path Length	طول المسار البصرى المكافئ
Thin Films	الأغشية الرقيقة
Diffraction Grating	محزوز الحيود
Spectral Lines	خطوط الطيف
Grating Spectrometer	مطياف ذو محزوز
Polarization	الاستقطاب
Plane-Polarization	استقطاب استوائى
Brewster's Angle	زاوية « بروستر »

الفصل الخامس والعشرون

English	العربية
Far Point	النقطة البعيدة
Near Point	النقطة القريبة
Myopia Or Nearsightedness	ميوبيا أو قصر النظر
Hyperopia Or Farsightedness	هايبروبيا أو طول النظر
Spherical Aberration	الزيغ الكرى
Chromatic Aberration	الزيغ اللونى
Linear Magnification	التكبير الخطى
Angular Magnification	التكبير الزاوى
Objective	العدسة الشيئية
Achromatic Lens	عدسة لا لونية
Eyepiece or Ocular	عدسة عينية
Refractors	التلسكوبات الكاسرة
Reflectors	التلسكوبات العاكسة
Angle of Deviation	زاوية الحيود
Dispersion	التفرق

الفصل السادس والعشرون

English	العربية
The Postulates of Relativity	فروض نظرية النسبية
Reference Frame	مناط إسناد
Inertial Reference Frame	مناط إسناد ذو قصور ذاتى
Simultaneity	التزامن
Relativistic Factor	معامل النسبية (العامل النسبوى)
Time Dilation	تمديد الزمن

Ben Rabah